

Herstellung von Zementen mit separater Feinstmahlung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. Kevin Treiber

aus Düsseldorf

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

23.10.2020

Dekan

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Heinz Palkowski

Betreuer

Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Philipp M. Fleiger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2015-2020 am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf. Dem VDZ und seiner Geschäftsführung danke ich für die Förderung des Projektes und die Möglichkeit eine Dissertation anzufertigen. Der Wissenschaftsstiftung der Zementindustrie "Gerd-Wischers-Stiftung" im VDZ danke ich für die Unterstützung mit einem Stipendium während meines Bachelor- und Masterstudiums.

Besonders möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Philipp Fleiger für die Betreuung und die Unterstützung bei meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferats bedanken. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Martin Schneider gilt mein Dank für viele die hilfreichen Anregungen bei dieser Arbeit. Für die Übernahme des Referats, die hilfreichen fachlichen Diskussionen und das Interesse am Fortgang der Arbeit danke ich Herrn Prof. rer. nat. Albrecht Wolter von der TU-Clausthal ganz besonders.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstituts, die durch ihren Einsatz im Labor, bei den Betriebsversuchen und durch ihre Diskussionsbereitschaft an der Erstellung dieser Arbeit Anteil haben, gilt mein Dank. Besonders möchte ich mich bei Frau Theresa Reinarz und den Herren Atilla Ar, Frank Dzaack, Marlon Feldt, Marcel Weber und Christoph Wichelhaus aus der mechanischen Verfahrenstechnik für ihre tatkräftige Mithilfe bedanken. Mein Dank gebührt insbesondere auch Herrn Jonas Knappert M.Sc., für seine fachliche Diskussionsbereitschaft und seine tatkräftige Mithilfe bei den Betriebsversuchen.

Meiner Familie danke ich für die mir entgegengebrachte Unterstützung, besonders aber meiner Frau Saskia möchte ich für ihren Zuspruch und ihr Verständnis danken.

Der Dyckerhoff-Stiftung sei für die Unterstützung weiter Teile dieser Arbeit und das damit entgegengebrachte Vertrauen herzlich gedankt. Die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) finanzierte das Forschungsprojekt welches die Grundlage weiter Teile dieser Arbeit war, mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hierfür sei ebenfalls gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	3
3	Stand der Forschung	6
3.1	Mahlung von Zement	6
3.2	Charakterisierung disperser Systeme	8
3.3	Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Zementeigenschaften	12
3.4	Gemeinsame und getrennte Mahlung der Hauptbestandteile von Zement	17
3.5	Bedeutung von Agglomerationen	19
3.6	Feinstzerkleinerung	21
3.6.1	Definition des Feinstbereichs	21
3.6.2	Feinstmahlanlagen	23
4	Darstellung des Versuchsprogramms	27
5	Trockene Feinstzerkleinerung von Zementhauptbestandteilen	29
5.1	Charakterisierung von Feinstanteilen durch Lasergranulometrie	29
5.2	Ansätze zur verfahrenstechnischen Optimierung trocken betriebener Rührwerkskugelmühlen für die Zementmahlung	33
5.3	Experimentelle Bestimmung der anlagenspezifischen Grenzen	40
6	Mahlversuche zur separaten Feinstmahlung	45
6.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe	45
6.2	Kleintechnische Mahlversuche	47
6.3	Mahlversuche in Industrieumgebung	51
6.3.1	Vormahlung in der Argo-Mühle	52
6.3.2	Feinstmahlung in einer trockenen Rührwerkskugelmühle	58
7	Modellbildung zur Optimierung der Mischungsanteile aus der separaten Feinstmahlung	64
7.1	Modell zur Identifikation optimaler Mischungsverhältnisse	64
7.2	Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung	67
7.3	Berechnung der Anteile der Zwischenprodukte	69
7.4	Randbedingungen und deren Einflüsse	70
7.5	Validierung der Mischungsrechnung	72

8	Kleintechnische Untersuchungen	74
8.1	Modellrechnungen und Herstellung der Mischungen	74
8.2	Zementeigenschaften	77
8.2.1	Festigkeitsentwicklung	78
8.2.2	Wasseranspruch	81
8.2.3	Hydratationswärmeentwicklung	82
8.3	Einfluss der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung auf die Zementeigenschaften	83
9	Bewertung des Energiebedarfs durch Mahlversuche in Industrieumgebung	86
9.1	Einfluss der Zwischenprodukte auf den spezifischen Energiebedarf	86
9.2	Festigkeitsentwicklung	90
10	Praktische Umsetzung der separaten Feinstmahlung	92
11	Zusammenfassung	94
12	Literatur	96
13	Anhang	103
A	Tabellen	103
B	Bilder	127
C	Berechnung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Korngrößenverteilungen	136
D	Voruntersuchungen zur Verwendung der Zwischenprodukte im Modell	137
E	Statistik zum mittleren spezifischen Energiebedarf von Kugelmühlen	138
F	Definition der Feinheitsbereiche bei der separaten Feinstmahlung	139

1 Einleitung

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das durch gemeinsame Mahlung oder getrennte Vermahlung von Zementklinker und anderen Haupt- und Nebenbestandteilen hergestellt wird. Der spezifische elektrische Energiebedarf der Zementherstellung beträgt 111 kWh/t, wobei etwa 70 % auf Zerkleinerungsprozesse entfallen und allein für die Zementmahlung etwa 51 kWh/t benötigt werden [VDZ 2018]. Eine 2018 durch den Verein Deutscher Zementwerke e.V. durchgeführte Umfrage [VDZ 2019] unter den Mitgliedsunternehmen zeigt, dass in Deutschland auch aktuell fast ausschließlich Kugelmühlen in der Zementmahlung eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad von Kugelmühlen liegt im Bereich von etwa 25 %, wenn die Einzelkornzerkleinerung als theoretisches Optimum angenommen wird [Fue; Abo 2002]. Effiziente Mahlverfahren, die ein Materialbett zerkleinern, wie beispielsweise Gutbett-Walzenmühlen oder Vertikal-Wälzmühlen, werden für die Zement-Fertigmahlung in Deutschland nur sehr selten genutzt. Kombinierte Mahlanlagen mit einer Vorzerkleinerung durch die Gutbett-Walzenmühle und einer Fertigmahlung in der Kugelmühle sind teilweise in Deutschland im Einsatz. Weltweit werden jedoch zunehmend effizientere Mahlverfahren für die Fertigmahlung von Zementen eingesetzt.

Kugelmühlen zeichnen sich jedoch durch eine hohe Zuverlässigkeit aus und können Produkte mit sehr breiten Korngrößenverteilungen herstellen. Diese breiten Korngrößenverteilungen wirken sich im Allgemeinen positiv auf die Verarbeitungseigenschaften der Zemente aus.

Seit vielen Jahren besteht ein Trend zu Zementen höherer Festigkeitsklassen (siehe auch **Bild 1-1**). Um diese zu erreichen, wird die Feinheit des Zements erhöht und folglich auch dessen Korngrößenverteilung verändert. Nach dem aktuellen Stand der Technik können gerade Kugelmühlen zuverlässig auch besonders feine Zemente produzieren. Den verschiedenen Bereichen der Korngrößenverteilung wird in der Literatur ein unterschiedlicher Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung zugesprochen. Bei der konventionellen Mahlung wird allerdings immer das gesamte Partikelkollektiv beansprucht. Es ist daher nur sehr bedingt möglich, die unterschiedlichen Bereiche der Korngrößenverteilung zu beeinflussen, ohne die anderen Bereiche ändern.

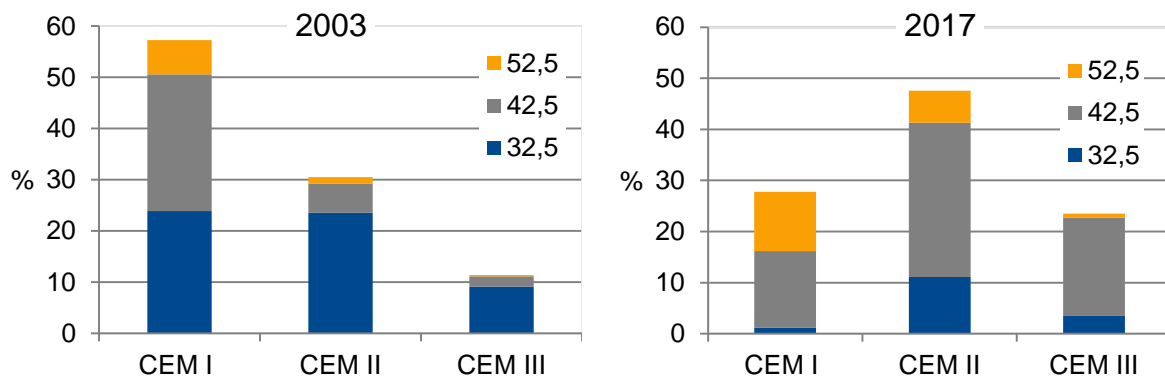


Bild 1-1 Absatzentwicklung der Zementsorten [VDZ 2018]

Das Verfahren der separaten Feinstmahlung bietet einen Lösungsansatz für die Integration effizienter Mahlverfahren und gleichzeitig die Möglichkeit den Anteil des Feinstmaterials unabhängig von der restlichen Korngrößenverteilung einzustellen. Die Entwicklung dieser Methodik sowie deren grundlegende wissenschaftliche Überprüfung sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Im Gegensatz zu Hochdruckzerkleinerungsverfahren und Kugelmühlen ist keine besondere Betriebserfahrung mit Feinstmahanlagen, wie bei der für diese Arbeit genutzten Rührwerkskugelmühle, für die Zementmahlung vorhanden. Dementsprechend wird zunächst die trockene Feinstzerkleinerung für Zement-Hauptbestandteile untersucht und bewertet. Wesentlich für die Akzeptanz neuer Verfahren ist die Sicherstellung der hohen Qualitätsstandards der Zemente, hierzu wird anhand von kleintechnischen Untersuchungen der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Zementeigenschaften untersucht. Im Weiteren wird anhand von Mahlversuchen in industrieller Umgebung der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf den spezifischen Energiebedarf untersucht.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Effiziente Mahlverfahren, die nach dem Prinzip der Hochdruckzerkleinerung arbeiten, sind besonders in ihrer maximal erreichbaren Produktfeinheit und ihrer Eignung, die Sulfatträger ausreichend zu entwässern, limitiert. Zudem produzieren diese Anlagen in der Regel steilere Korngrößenverteilungen als Kugelmühlen. Die ungewollte Herstellung zu feiner Partikel kann durch kurze Verweilzeiten in der Beanspruchungszone und effiziente Siebter reduziert werden. Durch einen geringeren Anteil feinsten Partikel treten weniger Agglomerationen auf. Ist der Feinstbereich jedoch unterrepräsentiert, kann sich dies negativ auf die Zementeigenschaften auswirken. Besonders die Frühfestigkeit und der Wasseranspruch können negativ beeinflusst werden. Hochdruckzerkleinerungsverfahren werden daher nur vereinzelt zur Zementfertigmahlung genutzt. Kugelmühlen sind zwar weniger effizient, können aber Produkte mit breiten Korngrößenverteilungen und den daraus resultierenden gewünschten Produkteigenschaften erzeugen. Bei der Mahlung in einer Mühle können die unterschiedlichen Bereiche der Korngrößenverteilung nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden. Da der Bereich der feinsten Partikel einen besonderen Einfluss auf die Frühfestigkeit und auch auf den Wasseranspruch hat, kann die unabhängige Einstellung des Fein- vom Grobbereichs der Korngrößenverteilung positiven Einfluss auf die Zementeigenschaften haben.

Durch eine anteilige separate Feinstmahlung wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad in der Produktion geschaffen, der die unabhängige Einstellung des Fein- vom Grobbereich der Korngrößenverteilung ermöglicht. Die separate Feinstmahlung teilt die Zementmahlung in zwei Mahlschritte auf (**Bild 2-1**). Der Großteil des Produktes wird im 1. Mahlschritt in effizienten Mühlen hergestellt. Größere Zementsorten können teilweise bereits durch diese Zwischenprodukte nachgebildet werden, wenn unterschiedlich feine Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt gemischt werden. Zemente höherer Festigkeitsklasse benötigen jedoch einen höheren Feinstanteil, der meist nicht in diesen effizienten Mühlen hergestellt werden kann. Diese fehlende Teilmenge wird separat in einem 2. Mahlschritt gemahlen. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie durch die Mischung der Zwischenprodukte aus beiden Mahlschritten bekannte Korngrößenverteilungen (nachfolgend Referenz-Korngrößenverteilung genannt) nachgebildet werden können und wie sich dies auf die Zementeigenschaften und den spezifischen Energiebedarf auswirkt.

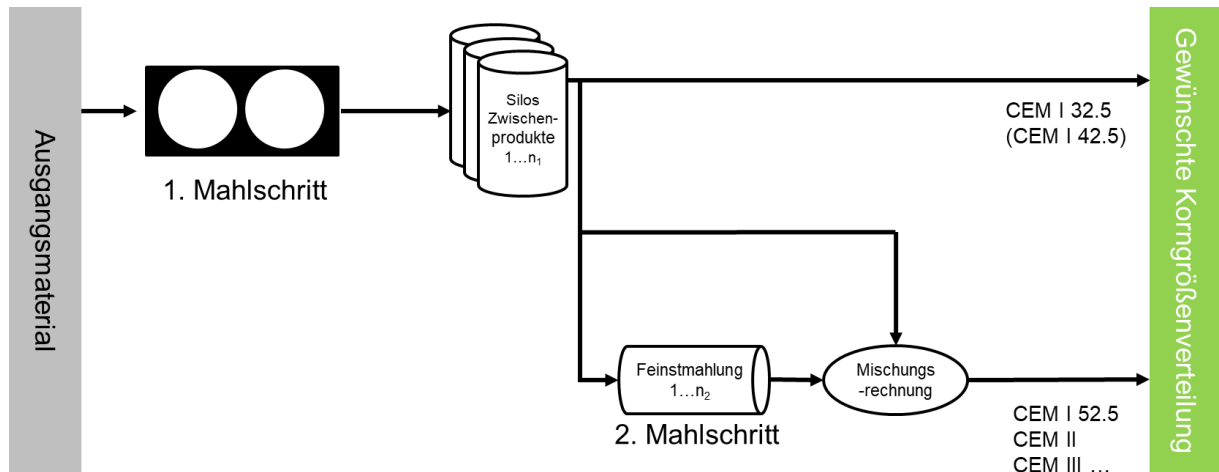


Bild 2-1 Konzept der separaten Feinstmahlung

Durch Nutzung möglichst großer Teilmengen des Mahlguts aus dem 1. Mahlschritt kann der spezifische Energiebedarf, im Vergleich zur Mahlung in einer Kugelmühle, deutlich gesenkt werden. Wird nur eine sehr geringe Teilmenge in einer nachgeschalteten Feinstmühle gemahlen, sinkt zudem die nötige Anlagengröße der Feinstmühle, im Vergleich zu Anlagen, die die gesamte Materialmenge mahlen. Auch wirkt sich die Verwendung geringer Materialanteile aus dem 2. Mahlschritt nur wenig auf den spezifischen Energiebedarf der Mischung aus. Dementsprechend bleiben die energetischen Vorteile der effizienten Mahlanlagen aus dem 1. Mahlschritt im Wesentlichen erhalten.

Zunächst muss der allgemeine Wissensstand hinsichtlich der material- und anlagenspezifischen Grenzen der Zerkleinerung von Zement und dessen Hauptbestandteilen verbessert werden. Am Beispiel von Rührwerkskugelmühlen wird beurteilt, inwieweit es möglich ist mit Feinstmühlen die Zementhauptbestandteile zu zerkleinern. Neben der eigentlichen Zerkleinerung ist auch die Charakterisierung der feinstgemahlenen Mehle von hoher Wichtigkeit. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit geeigneter Messtechnik im Betriebsalltag besteht großer Forschungsbedarf, der durch gezielte Betrachtung der Messtechnik zur Analyse von Korngrößenverteilungen verringert werden soll. Hierbei werden vor allem gängige Messtheorien und Auswirkungen verschiedener Messparameter bei der Lasergranulometrie untersucht.

Durch die separate Feinstmahlung kann der Feinstbereich der Korngrößenverteilung unabhängig von dem restlichen Produkt eingestellt werden. Die gewünschte Korngrößenverteilung soll durch praktisch herstellbare Zwischenprodukte nachgebildet werden. Aufgrund der Komplexität dieser Aufgabenstellung wird ein Modell benötigt, welches die bestmögliche Mischungszusammensetzung unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen aus den vorhandenen Zwischenprodukten berechnen kann. Darüber hinaus wird auch der spezifische Energiebedarf berechnet.

Ein entscheidender Faktor bei der Zementmahlung ist die Handhabbarkeit des Systems für das Personal und das Equipment. Das heißt, die Anzahl der Zwischenprodukte muss entsprechend gering bleiben, um die Komplexität des Mühlenbetriebs und der Mischungen möglichst niedrig zu halten. Des Weiteren soll das gesamte Produktportfolio des Zementwerks durch die separate Feinstmahlung hergestellt werden können, um eine maximal mögliche Effizienzsteigerung zu erreichen. Aufgrund der geringen Anzahl an Greenfield-Projekten ist zusätzlich die Möglichkeit der sukzessiven Implementierung in die bestehende Werksstruktur notwendig.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Teil wird die Eignung des vorgeschlagenen Verfahrens durch Verwendung von kleintechnischen Mahlanlagen untersucht. Hierzu werden zwei Klinker unterschiedlicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung verwendet (**Tabelle 6-1, Tabelle 6-2**). In einem 1. Mahlschritt werden die Klinker in einer Vertikal-Wälzmühle zu Zwischenprodukten unterschiedlicher Feinheiten gemahlen. In einem 2. Mahlschritt werden Teilmengen dieser Zwischenprodukte in einer diskontinuierlich betriebenen Rührwerkskugelmühle weiter aufgemahlen. Zur Untersuchung der Zementeigenschaften werden diese Zwischenprodukte in verschiedenen Kombinationen gemischt. Die Anteile der Zwischenprodukte an der Mischung werden mit Hilfe des Modells berechnet.

Im zweiten Teil der praktischen Untersuchungen werden Mahlanlagen in Industrieumgebung genutzt, um das Potential des Verfahrens zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs bei der Zementmahlung zu bestimmen. Hierzu wird zur Herstellung der Zwischenprodukte eine Argo-Mühle (1. Mahlschritt) genutzt. Eine Teilmenge des vorgemahlenen Materials wird im 2. Mahlschritt in einer horizontalen trocken betriebenen Rührwerkskugelmühle feinstgemahlen. Genutzt wird ein dritter Klinker industrieller Herkunft. Mithilfe der Modellrechnung wird die optimale Zusammensetzung der Zwischenprodukte berechnet, um Zemente, die in einer industriellen Kugelmühle hergestellt wurden, nachzubilden.

3 Stand der Forschung

3.1 Mahlung von Zement

Die typische in Deutschland verwendete Kugelmühle stammt aus den 1970er Jahren [Mül; Fle 2018]. Über die Jahre wurden verschiedenste Veränderungen und Optimierungen an fast allen Komponenten der Mahlanlagen durchgeführt. Das Zerkleinerungsprinzip dieser Mühlen bleibt jedoch zu großen Teilen erhalten. Kugelmühlen zeichnen sich generell durch eine hohe Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit aus. Die langjährige Erfahrung mit dem Betrieb dieser Anlagen und den mit ihnen erzeugten Produkten spiegelt sich zudem in der vergleichsweise häufigen Zahl an Neuinstallationen in Deutschland wider.

Neben hohen Feinheiten weisen Zemente aus Kugelmühlen in der Regel breite Korngrößenverteilungen auf, was zu sehr guten Verarbeitungseigenschaften führt. Zudem ist die Gips-Entwässerung in Kugelmühlen besonders gut im Vergleich zu anderen Mühltypen, die in der Zementindustrie eingesetzt werden. Die Kombination zwischen geeigneter Temperatur und ausreichender Verweilzeit in der Mahlkammer wirkt sich positiv auf die Umwandlung des Gips in Halbhydrat aus [Han 1973].

Die Einzelkornzerkleinerung ist energetisch am effizientesten [Sti 1994]. Sie ist jedoch in der industriellen Mahlung kaum zu realisieren. In der Kugelmühle kann, im Vergleich der gängigen Mahlverfahren bei der Zementmahlung, am ehesten eine Einzelkornzerkleinerung beobachtet werden. Auf der anderen Seite ist die Beanspruchung nicht in jedem Fall garantiert. Die industrielle Realisierbarkeit der Einzelkornzerkleinerung steigt mit der Partikelgröße. In der Grobmahlkammer von Kugelmühlen wirken meist Prall- und Schlagbeanspruchungen auf das Mahlgut ein und zerkleinern es auf diese Weise, wohingegen in der Feinmahlkammer eher Druck-, Scher- und Reibbeanspruchungen vorherrschen [Fle 2014]. Das Fehlen von Mahlgut zwischen den Mahlkörpern führt zu direkten Kugel-Kugel-Kontakten. Wird die Beanspruchungsenergie nicht vollständig in Bruchvorgänge umgesetzt entstehen Wärme und Schall. Der Wirkungsgrad von Kugelmühlen beträgt etwa 25 %, bezogen auf die Einzelkornzerkleinerung als theoretisches Optimum [Fue; Abo 2002].

Unter anderem führen die verhältnismäßig langen Verweilzeiten von 5 bis 15 Minuten [Sch 1998] im Mühlenrohr zu einem hohen Feingutanteil des Mühlenaustragsgutes und damit zu einer teilweisen Übermahlung. Im Vergleich zu Mahlverfahren mit kürzeren Verweildauern in der Beanspruchungszone ist die Menge des im Kreislauf gefahrenen Materials geringer. Besonders durch den spezifischen Energieeintrag in das Material wird die Breite der Korngrößenverteilung beeinflusst. Durch den hohen Feinstanteil entstehen breite Korngrößenverteilungen, was sich positiv auf den Wasseranspruch der Zemente auswirkt [Mül 2000].

Verschiedene Mühlentypen arbeiten nach dem Prinzip der Hochdruckzerkleinerung. Besonders die Vertikal-Wälzmühle und die Gutbett-Walzenmühle sind in der Zementmahlung weltweit stark verbreitet. Hochdruckzerkleinerung ist energetisch wesentlich effizienter als die Zerkleinerung in Kugelmühlen. Durch die in das Mahlbett eingetragene Energie entstehen Verschiebungen der Partikel, Reibungsvorgänge zwischen den Partikeln sowie die Zerkleinerung des Materials. Im Vergleich zu Kugelmühlen wird ein großer Teil der eingetragenen Energie in den Bruchvorgang umgesetzt, da sich immer Material zwischen den Mahlwerkzeugen befindet. Dies führt zu deutlich niedrigeren spezifischen Energiebedarfen bei gleicher spezifischer Oberfläche nach Blaine.

In Vertikal-Wälzmühlen wird zwischen dem Mahlteller und den Mahlwalzen ein Mahlbett erzeugt, in welchem häufig Druck- und Scherbeanspruchungen beobachtet werden können. Die Verweilzeit in der Beanspruchungszone von Vertikal-Wälzmühlen ist wesentlich kürzer als bei Kugelmühlen [Fah 2013]. Vertikal-Wälzmühlen beinhalten in den meisten Fällen einen Siebtrichter im Mühlengehäuse. Dieser wird größtenteils pneumatisch, anteilig aber auch mechanisch beschickt. In Vertikal-Wälzmühlen werden hohe Umläufe von 6-20 vermutet [Fah 2013]. Mit sinkender Verweilzeit und dementsprechend steigender Materialmenge im Umlauf wird die Korngrößenverteilung enger, womit auch der Wasseranspruch zum Erreichen der Normsteife ansteigt. Die zuverlässige Messung der inneren Materialströme ist nach aktuellem Stand der Technik in Vertikal-Wälzmühlen nicht möglich. Die vergleichsweise hohe Komplexität von Vertikal-Wälzmühlen führt zu höheren Anforderungen an den Betrieb hinsichtlich der Stabilität des Systems. Besonders bei hohen Feinheiten und Entlüftungsproblemen des Mahlbetts neigen diese Mühlentypen zu Schwingungen und Vibrationen, die im schlimmsten Fall zu Schäden an der Mahlanlage führen können.

Gutbett-Walzenmühlen zerkleinern das Mahlgut durch Druck im Mahlpalt. Ebenso wie bei Vertikal-Wälzmühlen kann es während des Betriebs zu starken Vibrationen und dementsprechend zu Anlagenabschaltungen kommen. Besonders feines und inhomogen aufgegebenes Mahlgut kann die Vibrationsneigung erhöhen. In Abhängigkeit von der Art und der Zusammensetzung des Mahlguts wird die maximale Mahlfeinheit stark eingeschränkt. Die Beanspruchungsdauer im Walzenspalt von Gutbett-Walzenmühlen beträgt nur wenige Sekunden und ist damit nochmals wesentlich kürzer als in Vertikal-Wälzmühlen [Sch 1998]. Die im Kreislauf gefahrene Materialmenge bei der Fertigmahlung mit der Gutbett-Walzenmühle ist wesentlich größer als bei Kugelmühlen-Mahlkreisläufen. Entsprechend stellen sich bei der Fertigmahlung in der Gutbett-Walzenmühle enge Korngrößenverteilungen ein.

Gutbett-Walzenmühlen werden oft zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Erhöhung des Anlagendurchsatzes vorhandenen Kugelmühlen vorgeschaltet. Hierbei wird von Teil-Fertigmahlung und Hybridmahlung gesprochen. Bei der Vorzerkleinerung in Gutbett-Walzenmühlen kann es zu Mikrorissen in den Partikeln kommen, die im Fall erneuter Beanspruchung zu einer vereinfachten Zerkleinerung führen [Wol 1988].

„Als maßgebend für die unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften von Zementen aus Gutbett-Walzenmühlen erwies sich die gegenüber Kugelmühlzementen deutlich engere Korngrößenverteilung“ [Mül 2000].

3.2 Charakterisierung disperser Systeme

Bei der Zerkleinerung disperser Systeme können unterschiedliche Intentionen verfolgt werden. Die Partikelform kann ein wichtiger Anforderungspunkt sein oder, wie in der Zementindustrie, die Erhöhung der spezifischen Oberfläche und die Herstellung einer Korngrößenverteilung mit definierten Eigenschaften. Auch Nebenaspekte wie die Trocknung des Aufgabeguts können wichtige Aufgabenstellungen sein. Die Mahlgüter müssen charakterisiert werden, um Rückschlüsse auf die Produkteigenschaften zur Qualitätssicherung und auf den Betrieb der Anlage ziehen zu können. Diesbezüglich sind verschiedene Verfahren gängig.

Die Mahlfeinheit von Zementen wird oft durch die spezifische Oberfläche mit dem Verfahren nach Blaine [DIN 66126-2] bestimmt. Das Verfahren wird teils manuell, größtenteils aber teil-automatisiert durchgeführt, und liefert Messergebnisse von guter Vergleichbarkeit und hoher Wiederholungsgenauigkeit. Es zeigt sich jedoch auch eine grundsätzliche Bedienerabhängigkeit der Messergebnisse. Die spezifische Oberfläche nach Blaine von CEM I-Zementen korreliert in der Regel besonders gut mit den Ergebnissen aus Druckfestigkeitsuntersuchungen (siehe **Bild 3-1**). Die Aussagekraft der spezifischen Oberfläche ist jedoch begrenzt, da sie nur einen Parameter zur Beschreibung des gesamten Partikelkollektivs nutzt. Unter anderem der Wasseranspruch, als weitere wesentliche Zementeigenschaft, kann hiermit nicht ausreichend gut korreliert werden.

Der Messbereich des Verfahrens nach Blaine deckt auch aktuelle Zementsorten ab und eignet sich daher ausreichend gut zur Qualitäts- und Produktionskontrolle – eine direkte Regelung erfolgt mit Hilfe der spezifischen Oberfläche nach Blaine jedoch nicht, da das Verfahren nicht vollständig automatisierbar und damit nicht direkt in den Prozess integrierbar ist.

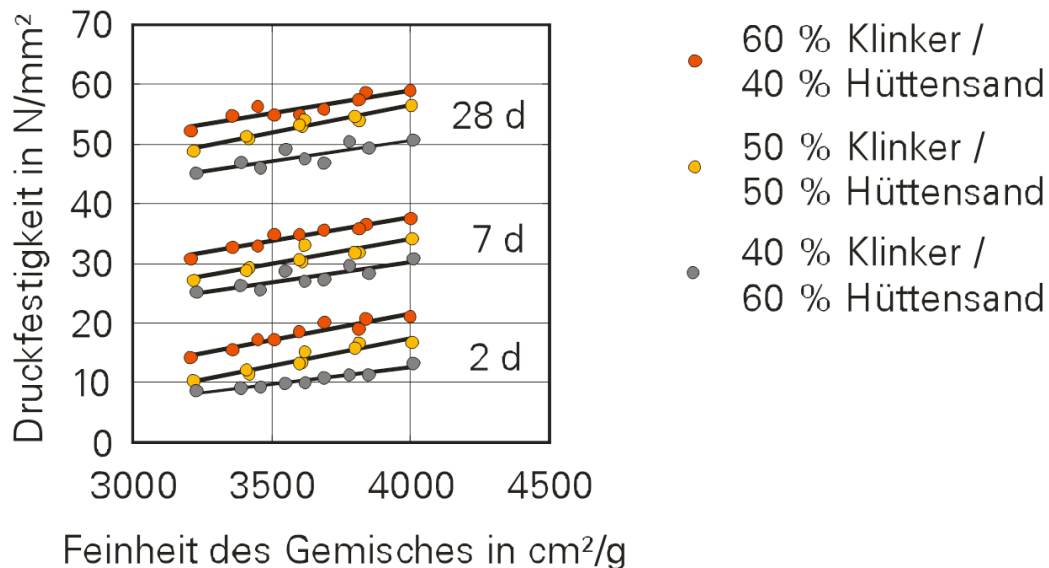


Bild 3-1 Normdruckfestigkeit von Klinker-Hüttensand-Mischungen unterschiedlicher spezifischer Oberfläche nach Blaine [Mül 2000]

Neben der spezifischen Oberfläche wird auch die Partikelgröße charakterisiert. Zur Beurteilung der Korngrößen und Fraktionen von Partikeln können verschiedene Laborverfahren (z.B. Sedimentationsanalyse, Kaskadenimpaktor, Analysesiebung oder Mikroskopie) genutzt werden, auch diese sind jedoch nicht vollständig in den Betrieb integrierbar. Darüber hinaus sind bildgebende Verfahren am Markt verfügbar, die automatisiert arbeiten können. Diese sind jedoch nach aktuellem Stand der Technik in ihrer maximalen Auflösung deutlich eingeschränkt.

Bei der Herstellung moderner leistungsfähiger Zemente wird mittlerweile überwiegend die gesamte Korngrößenverteilung durch Lasergranulometrie bestimmt. Im Gegensatz zu dem Verfahren nach Blaine ist die Lasergranulometrie automatisiert in den Prozess integrierbar (At-Line). Betriebserfahrungen in einem Zementwerk zeigen, dass die Überwachung der Korngrößenverteilung in Echtzeit möglich ist. Hierzu wurde ein Malvern Insittec® Messgerät installiert [Sch; Sch 2014]. In der Regel wird die Lasergranulometrie jedoch Off-Line durchgeführt und unterliegt durch die Probenahme einer zeitlichen Diskretisierung.

Das Ergebnis der Korngrößenverteilung wird meist als Durchgangssummenverteilung (Q) und Dichtefunktion (q) dargestellt, wobei die Abszisse in der Regel logarithmisch aufgetragen wird (siehe auch Anhang C). In dieser Arbeit wird die Durchgangssumme in Volumen-% (Q_3) und die daraus resultierende Verteilung (q_3) der Partikel verwendet, oft wird aber auch die Massenverteilung oder die Anzahlverteilung genutzt. Korngrößenverteilungen von Zementen werden mathematisch fast ausschließlich durch die Funktion nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennet (kurz RRSB-Funktion) beschrieben (siehe auch **Gleichung 1**). Neben der guten Eignung dieser Gleichung zur Beschreibung der Korngrößenverteilung von Mahlgütern ist auch die einfache Be-

schreibung der Durchgangssummenverteilung des Partikelkollektives durch nur zwei Parameter, den Lageparameter (x' oder d') und das Steigungsmaß (n), von Vorteil. Der Lageparameter gibt Auskunft über die Korngröße (x) bei einem Durchgang von 63,2 % der Durchgangssummenverteilung. Das Steigungsmaß beschreibt die Breite der Korngrößenverteilung. Die RRSB-Funktion kann den Feinst- und Grobbereich der Korngrößenverteilung jedoch nicht immer gut abbilden. Mithilfe verschiedener Verfahren (linear, gewichtet linear und nicht-linear) kann die RRSB-Funktion approximiert werden. Aufgrund der hohen Approximationsgüte ist besonders auch das Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead dazu gut geeignet. [Sch 1999] Das Downhill-Simplex-Verfahren [Lag; Ree; Wri; Wri 1998] wurde daher im Folgenden für die Darstellung der Ergebnisse in dieser Arbeit genutzt. Das Verfahren findet ebenfalls Anwendung in den nachfolgend beschriebenen Modellrechnungen.

$$Q_3(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x}{x'}\right]^n} \quad \text{Gleichung 1}$$

Bei der Lasergranulometrie werden kohärente Lichtstrahlen bei Kontakt mit den Partikeln der zu analysierenden Probe abgelenkt. Dies ist auf den Wellen-Teilchen-Charakter von Licht zurückzuführen. Als Folge dessen entstehen Intensitätsmuster auf der Brennebene (**Bild 3-2**). Die durch die Partikelkollektive ausgelösten Intensitätsmuster können durch die zugrundeliegenden Lichtstreuungstheorien (z.B. Mie-Theorie oder Fraunhofer-Näherung) interpretiert werden. Der Einfluss des materialabhängigen Brechungsindex wird bei der Fraunhofer-Näherung unter gewissen Rahmenbedingungen vernachlässigt. Hierdurch wird das Partikelkollektiv gröber bewertet als z.B. durch die Nutzung der Mie-Theorie.

Mithilfe des Lasergranulometers kann im Nass- und Trockenverfahren gemessen werden. Die Trockenmessung eignet sich sehr gut zur Produktionskontrolle. Hierbei wird meist Druckluft zur Dispergierung und als Transportmedium genutzt. Mit unterschiedlichem Druck können unterschiedliche Dispergierungsgrade erreicht werden. Bei Betrachtung des Feinstbereichs eignet sich das Nassverfahren besser, da Agglomerationen durch das Dispergierungsmittel (z.B. Ethanol) besser aufgelöst werden können. Hierzu wird das Mahlgut für eine bestimmte Zeitspanne in einem Ultraschallbad vordispersiert. Die Intensität und die Dauer der Dispergierung sind dabei entsprechend der erwarteten Feinheit der Partikel und deren Neigung zur Agglomeration einzustellen. In dieser Arbeit wurde ein Cilas 1190LD Lasergranulometer zur Nassmessung verwendet (siehe auch **Bild 3-2**). Dieses teilt das Messergebnis in 100 Messpunkte zwischen 0,02 und 2500 μm ein, wobei diese nicht-äquidistant verteilt sind. Der für Zemente interessante Bereich bis zu einer Korngröße von 100 μm wird durch die ersten 62 Messpunkte gut abgebildet. Auch der Feinbereich unter 8 μm ist mit 30 Messpunkten stark ausgeprägt.

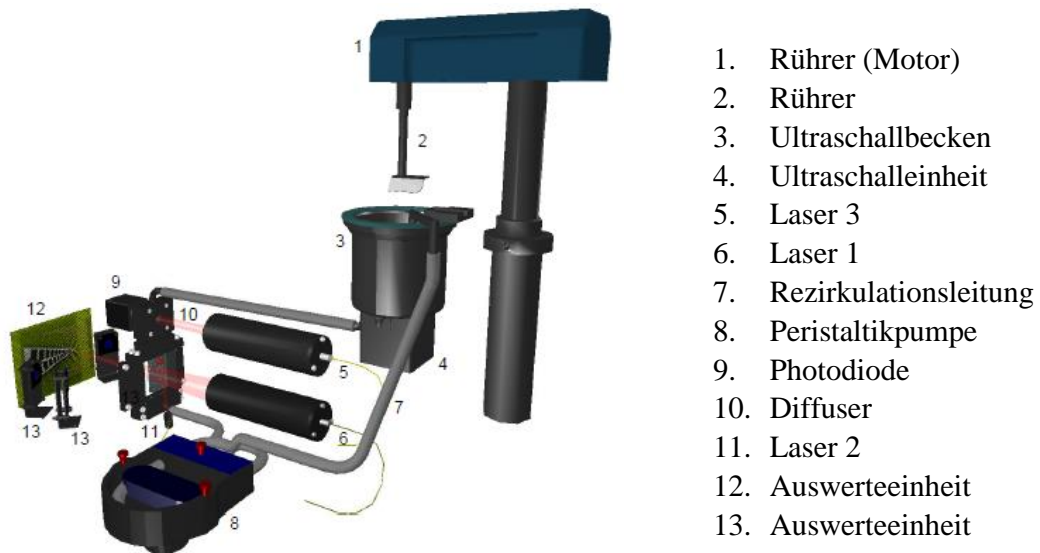


Bild 3-2 Funktionsprinzip eines Cilas 1190LD Lasergranulometers [Cil 2011]

Die Ergebnisse, die in verschiedenen Lasergranulometern erzeugt werden, weichen teils stark voneinander ab. Gründe für unterschiedliche Messergebnisse können sein:

- Materialvorbereitung (Teilung, Homogenisierung),
- Gerätespezifische Unterschiede (Trocken, Nass, Dispergiereinheit, Rührer),
- Geometrie (Sedimentation, Entmischung),
- Unterschiede in der "Standard Operating Procedure" (SOP) sowie die
- Software (Glättung, Berechnungsalgorithmen).

Bild 3-3 zeigt den Einfluss des Messgeräts auf das Ergebnis der Korngrößenverteilung, dargestellt durch die gemessene mittlere Partikelgröße ($x_{50\%}$). Die Messergebnisse des verwendeten Cilas Lasergranulometers streuen im Vergleich zu den Sympatec Lasergranulometern HELOS nur sehr wenig. Bereits die Dispergierung vor der eigentlichen Messung zeigt einen deutlichen Einfluss auf das Messergebnis. In der Darstellung handelt es sich bei CUVETTE und SUCCELL um unterschiedliche mit einer Suspension betriebenen Dispergiereinheiten (nass), genutzt im selben Sympatec HELOS Lasergranulometer. Dem gegenübergestellt sind die Ergebnisse der Messungen mit der Trockendispergiereinheit RODOS des HELOS Lasergranulometers. [Haa 2016] Die unterschiedlichen Messergebnisse der Geräte führen zu Schwierigkeiten bei dem Vergleich der Messergebnisse zwischen den Zementwerken.

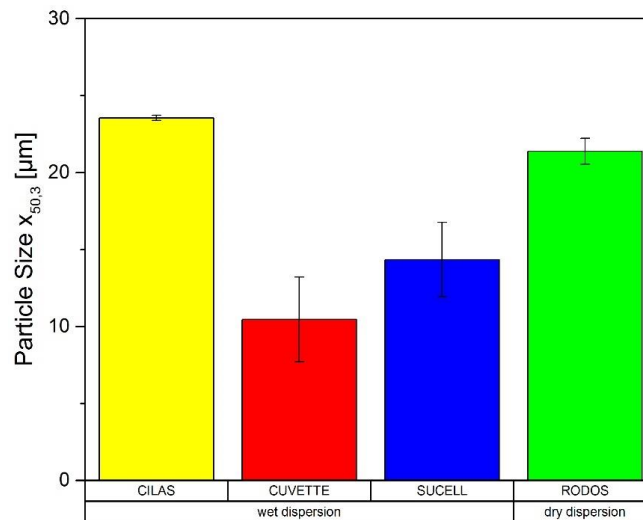


Bild 3-3 Auswertung des Messergebnisses der Korngrößenanalyse auf unterschiedlichen Geräten, dargestellt durch die Korngröße bei einem Durchgang von 50 % [Haa 2016]

Zur Deutung der Messergebnisse der Laserbeugung wird im Allgemeinen die Fraunhofer-Näherung verwendet [Kus; Wij; Tho 1991]. Hier wird ein einheitlicher Wert zur Beschreibung des materialabhängigen Brechungsindex angenommen. Diese Annahme ist gültig, wenn ein Großteil der gemessenen Korngrößenverteilungen größer als 8 μm ist und der Unterschied zwischen den Brechungsindizes von Dispergierungsmittel und gemessener Probe ausreichend groß ist. Werden Mahlgüter mit hohen Anteilen kleiner 8 μm untersucht, wird empfohlen, die Mie-Theorie zu verwenden [ISO 13320-1 1999-11]. Die Mie-Theorie bezieht den Brechungsindex des Materials ein und damit auch die Absorption von Licht durch das Material, also die nicht vollständige Beugung von Licht. Problematisch ist die Bestimmung des Brechungsindex. Zwar existieren umfassende Datenbanken zu vielen Stoffen, jedoch ist die Möglichkeit Brechungsindizes zu verwenden, besonders bei Mahlgütern mit unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung (wie Klinker), stark eingeschränkt. Der Literatur kann ein genereller Brechungsindex für Zemente von $1,68 \pm 0,1i$ entnommen werden [Cil 2017]. Werden Literaturwerte genutzt, ist die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge des verwendeten Lasers zu beachten.

3.3 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Zementeigenschaften

Bei der Zementmahlung, als letztem Schritt in der Zementherstellung, werden die Zementeigenschaften maßgeblich beeinflusst. Durch die Mahlung wird die spezifische Oberfläche vergrößert, wodurch die Reaktivität des Zements erhöht wird. Höhere Zementfeinheiten führen zu höheren Normfestigkeiten sowie höheren Wasseransprüchen (siehe **Bild 3-4**). Dies lässt sich durch die höhere reaktive Oberfläche des Zements bei gleichem Volumen der Schüttung begründen [Spr; Kuh; Ell 1985].

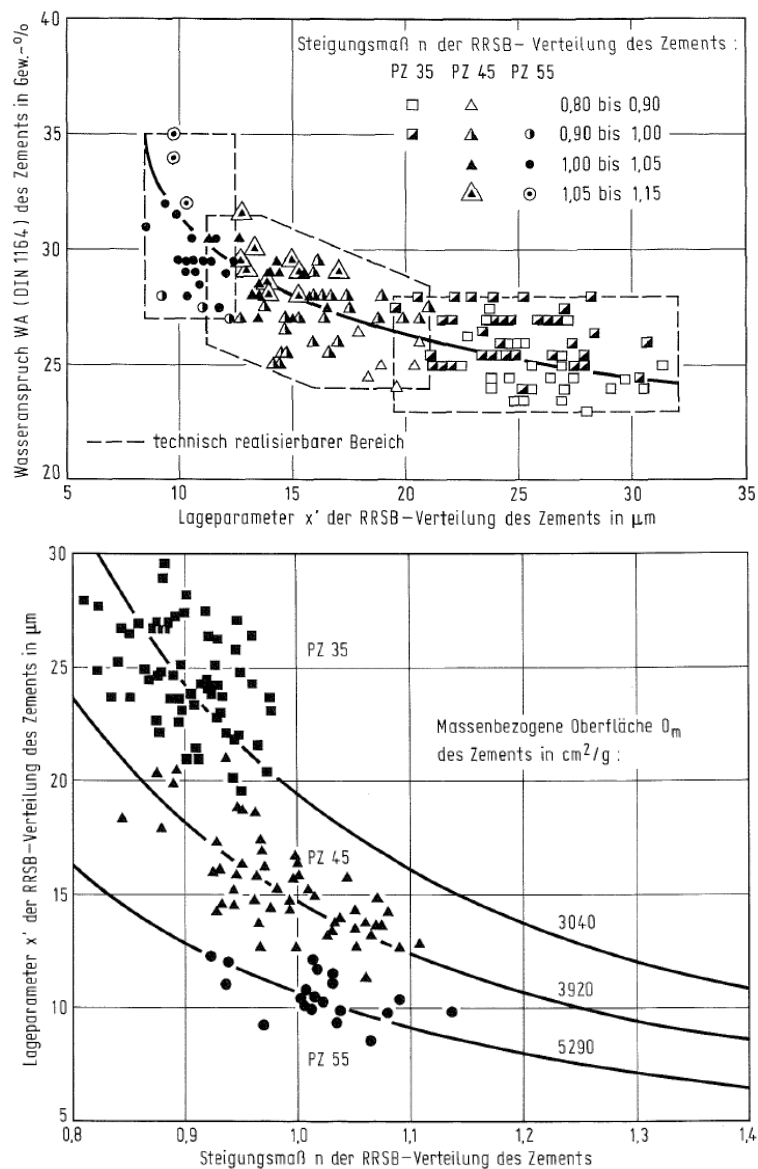


Bild 3-4 Zusammenhang zwischen Lageparameter und Steigungsmaß der RRSB-Verteilung von Portlandzementen und Wasseranspruch (links) sowie der spezifischen Oberfläche nach Blaine und Festigkeitsklasse (rechts) [Kuh 1985].

Der Wasseranspruch des Zements zum Erreichen der Normkonsistenz lässt sich durch die Breite der Korngrößenverteilung des Zements beeinflussen. Enge Korngrößenverteilungen weisen bei ähnlicher Feinheit höhere Wasseransprüche auf (siehe auch **Bild 3-4** links). Dies ist auf die geringere Packungsdichte, verglichen mit breiten Verteilungen, zurückzuführen. Ein Wasseranteil in einer Größenordnung von etwa 25-30 M.-% wird physikalisch benötigt, um die Partikel gegeneinander beweglich zu machen [VDZ 2008]. Bei engen Verteilungen sind die Hohlräume zwischen den Partikeln besonders groß, womit der Wasserbedarf steigt.

Unterschiedliche Korngrößenverteilungen können die gleiche spezifische Oberfläche nach Blaine aufweisen. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der spezifischen

Oberfläche und den Parametern der RRSB-Funktion. Wird eine Korngrößenverteilung breiter, sind bei gleichem Lageparameter mehr feine und mehr grobe Partikel enthalten und die spezifische Oberfläche steigt. Die größere Anzahl feinerer Klinker-Partikel führt zu einer signifikanten Steigerung der Frühfestigkeit (siehe auch **Bild 3-5**). Feine Partikel reagieren aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche schneller. Untersuchungen haben die Auswirkungen verschiedener Klinkerfraktionen auf die Festigkeitsentwicklung dargestellt. Besonders der Anteil in den feineren Fraktionen im Klinker (0-3 μm) wirkt sich stark auf die Frühfestigkeit aus, wohingegen sehr grobe Partikel (> 50 μm) als inert gelten und sich nur noch wenig an der Festigkeitsentwicklung beteiligen [Loc 1966].

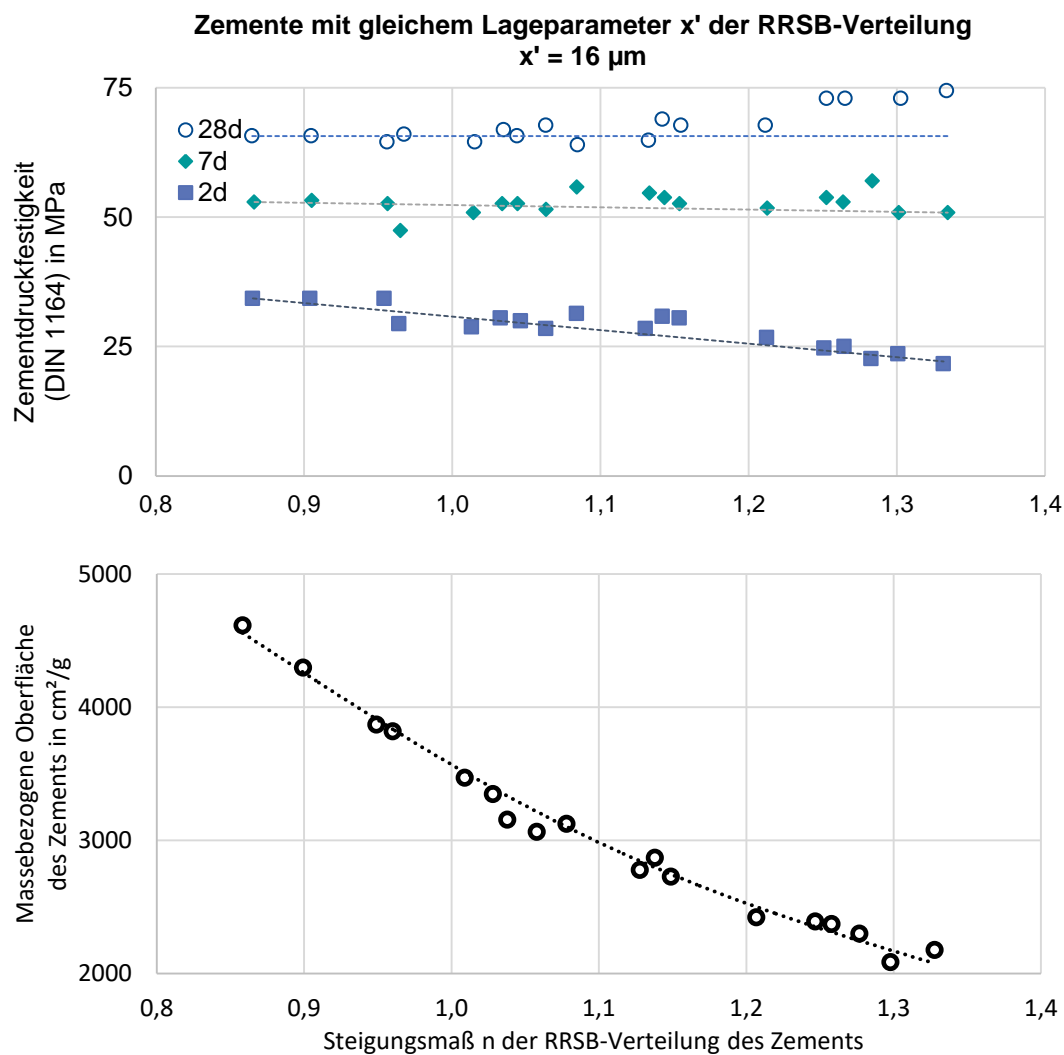


Bild 3-5 Druckfestigkeit (DIN 1164) und massebezogene Oberfläche der Laborzemente mit gleichem Lageparameter, in Abhängigkeit vom Steigungsmaß der RRSB-Verteilung [Kuh 1985]

Die Festigkeit nach 7 und 28 Tagen steigt stärker als die Frühfestigkeit, wenn der Anteil grober Partikel reduziert und der Anteil der feinen Partikel gleichzeitig möglichst konstant gehalten wird. **Bild 3-6** stellt diesen Zusammenhang dar. Bei konstanter spezifischer Oberfläche stellt sich eine engere Korngrößenverteilung ein, wenn der Lageparameter reduziert wird. Wie bereits oben beschrieben, steigt auch hier der Wasseranspruch deutlich [Kuh 1985].

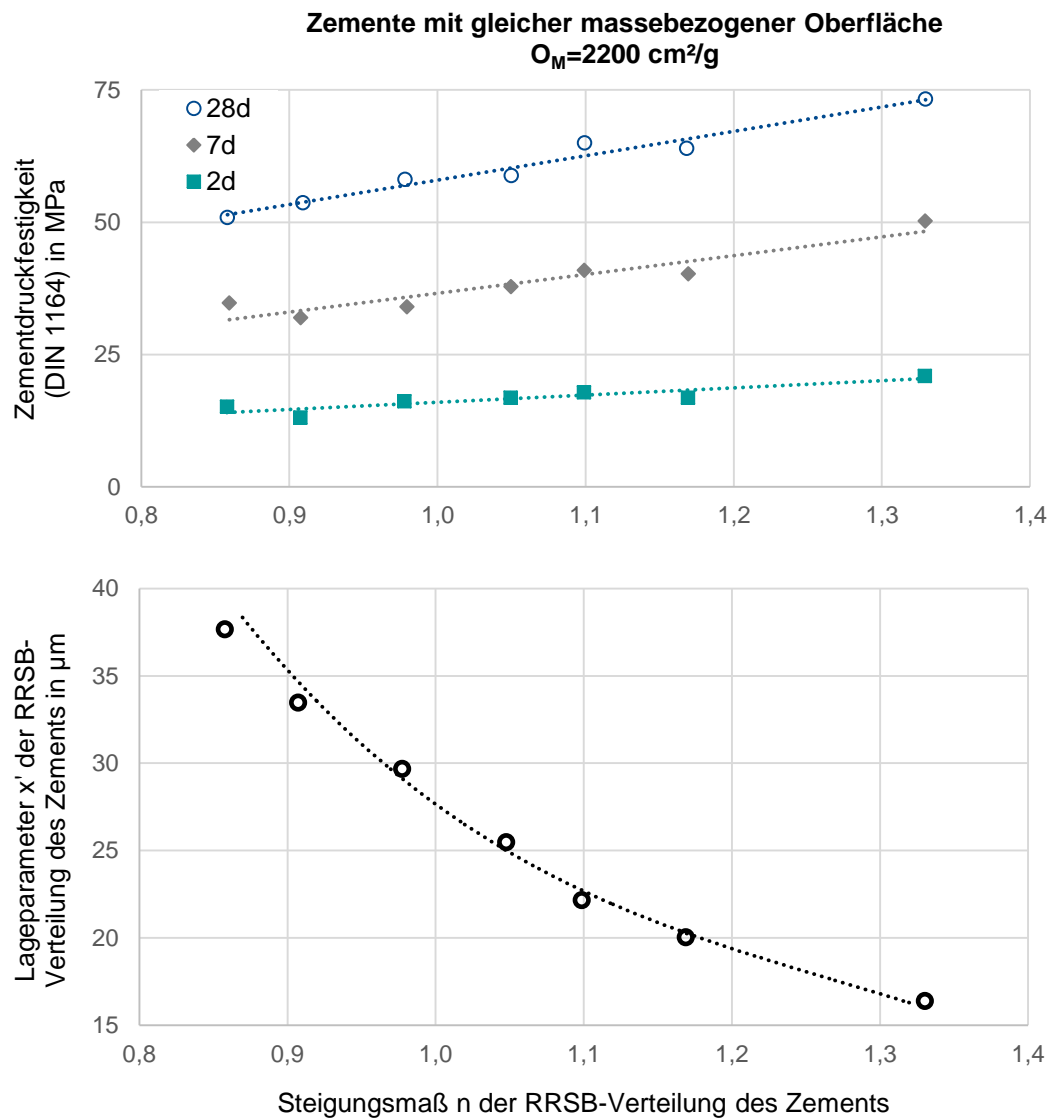


Bild 3-6 Druckfestigkeit (DIN 1164) und Lageparameter der RRSB-Verteilung bei gleicher massebezogener Oberfläche, in Abhängigkeit vom Steigungsmaß der RRSB-Verteilung [Kuh 1985]

Die Hohlräume in der Schüttung eines Partikelsystems haben, neben dem bereits angeführten Einfluss auf den Wasseranspruch, auch Auswirkungen auf die Druckfestigkeit. Der zugefügte Wasseranteil beeinflusst die Zusammensetzung des Zementsteins direkt. Zu hohe Wasser/Zement-Werte verursachen eine zunehmende Anzahl an Kapillarporen, die unmittelbar zu einer Festigkeitsverminderung führen [VDZ 2008].

Die Korngrößenverteilung von Partikelsystemen steht in direktem Zusammenhang mit deren Hohlraumvolumen [And; And 1930]. Stetige Korngrößenverteilungen weisen mit steigender Breite eine ebenfalls steigende Raumausfüllung auf [Res 2001]. **Gleichung 1** zeigt die von Fuller entwickelte Funktion, um eine Korngrößenverteilung (D) mit bestmöglicher Raumausfüllung darstellen zu können [Ful; Tho 1907]. Die Funktion ist vom Maximalkorn (x_{Max}) und von der Rundheit der Partikel (n) abhängig. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Mahlverfahren keinen Einfluss auf die Kornform hat [See 2008].

$$D(x) = \left(\frac{x}{x_{Max}} \right)^n \quad \text{Gleichung 1}$$

Da die Raumausfüllung des gesamten Partikelkollektivs (z.B. Beton oder Mörtel) betrachtet werden muss, hat Palm in seiner Dissertation die Fuller-Verteilung durch verschiedene gestufte Kornfraktionen nachgebildet und die Packungsdichte im Pyknometerverfahren gemessen. Hier wurden im Bereich des Zements unter anderem Feinstzemente und Feinsthüttensande eingesetzt. Bezogen auf die Raumauffüllung konnte ein optimiertes Bindemittel hergestellt werden. [Pal 2009].

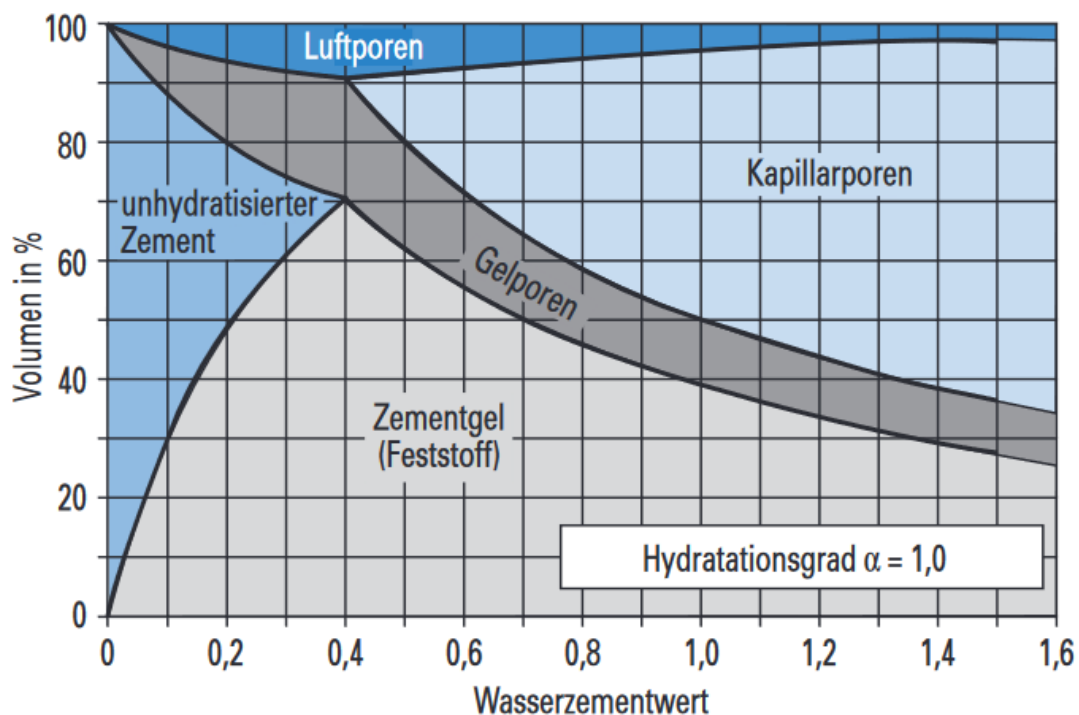


Bild 3-7 Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert

Bei der Optimierung der Rezeptur von Mörtel oder Beton ist auch der Wassorzementwert (w/z-Wert) wichtig. **Bild 3-7** zeigt die Anteile der Poren im hydratisierten Ze-

mentstein bei verschiedenen w/z-Werten. Ist zu wenig Wasser verfügbar, kann der Zement nicht vollständig hydratisieren. Ein Überangebot an Wasser führt zur vermehrten Bildung von Kapillarporen. Bei der Untersuchung der Zementeigenschaften am Mörtel wird nach DIN EN 196-1 ein w/z-Wert von 0,5 vorgegeben. Bei der Optimierung der Rezeptur des Betons ist der Wasseranteil jedoch ein wesentlicher Freiheitsgrad und beeinflusst auch die Festigkeit.

3.4 Gemeinsame und getrennte Mahlung der Hauptbestandteile von Zement

Zement besteht immer aus Zementklinker, aber auch weitere Hauptbestandteile wie Kalkstein, Hüttensand und verschiedene Materialien mit Puzzolanen-Eigenschaften werden mit zunehmender Häufigkeit eingesetzt. Je nach Zementtyp werden unterschiedliche Anteile dieser Hauptbestandteile verwendet. Die unterschiedlichen Hauptbestandteile unterscheiden sich unter anderem in der Art der Teilnahme am Zement-Erhärtungsprozess und in ihrer Mahlbarkeit.

Kalkstein beteiligt sich nur wenig an der chemischen Reaktion des Zements mit Wasser, wesentlich ist die physikalische Wirkung als Füllmaterial [Loc 2000]. Aufgrund seiner leichten Mahlbarkeit ist Kalkstein gut geeignet, um den ausschließlich energie- und emissionsintensiv herstellbaren Klinker im Zement zu substituieren.

Granulierte Hochofenschlacke, auch Hüttensand genannt, wird ebenfalls zur Reduzierung des Klinker-Zement-Faktors eingesetzt. Hüttensand hat latent hydraulische Eigenschaften, welche zu einer zunächst schwachen, später gleichwertigen Teilnahme an der hydraulischen Reaktion führen. Um die veränderte Hydraulizität von Kompositzementen auszugleichen, kann bei der gemeinsamen Mahlung der Hauptbestandteile der Zement nur feiner aufgemahlen werden. Durch getrenntes Mahlen und Mischen kann die der Feinheit der einzelnen Hauptbestandteile angepasst werden.

Die Mahlbarkeit bestimmt den Energiebedarf für die Zerkleinerung des Mahlgutes. Für Mahlbarkeitsprüfungen werden die Verfahren nach Bond und nach Zeisel genutzt. Die Verfahren können zur Auslegung der gängigen Mühlentypen oder zur Materialcharakterisierung verwendet werden. In **Bild 3-8** sind die typischen Mahlbarkeiten nach Zeisel für verschiedene Zement-Hauptbestandteile dargestellt. Leicht mahlbare Stoffe wie Kalkstein sind bei gleicher Beanspruchung in wesentlich kürzerer Zeit fein gemahlen, als schwerer mahlbare Stoffe wie Klinker oder Hüttensand.

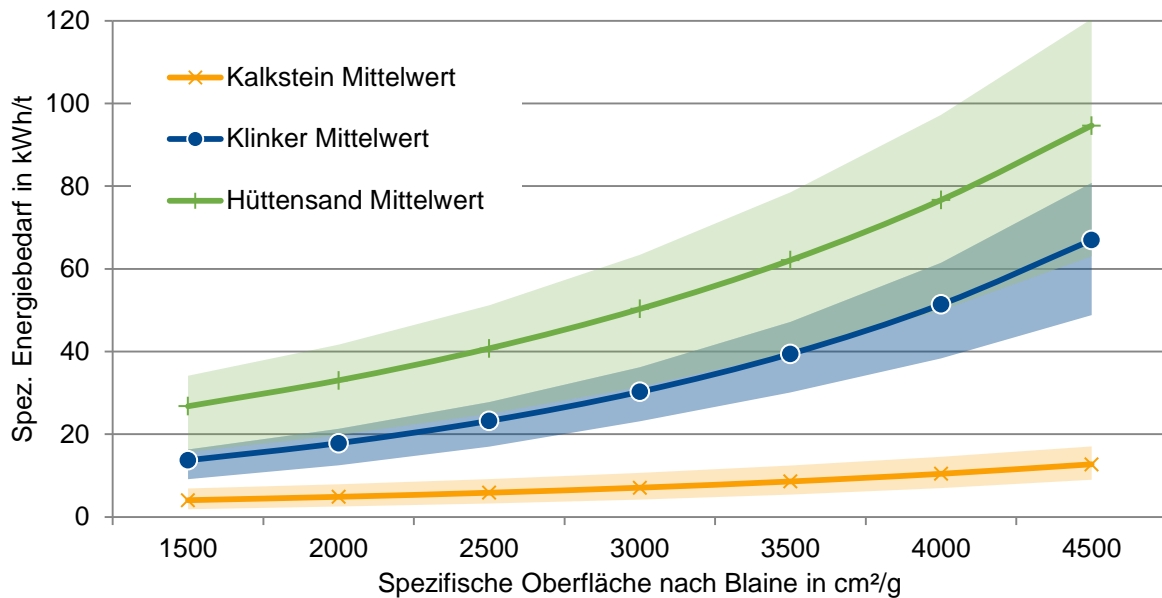


Bild 3-8 Typische Mahlbarkeiten nach Zeisel der wesentlichen Zement-Hauptbestandteile

Untersuchungen zeigten, dass sich das leichter mahlbare Material bei der gemeinsamen Mahlung in der Feinfraktion anreichert (**Bild 3-9**). Die leichter mahlbare Komponente hat meist eine breitere innere Korngrößenverteilung als die schwerer mahlbare Komponente [Mit 1996] [Sch 1992]. In Abhängigkeit der Materialeigenschaften der Bestandteile kann dies jedoch auch gewünscht sein. In anderen Fällen fehlt hier ein entscheidender Freiheitsgrad zur Optimierung der Produkteigenschaften.

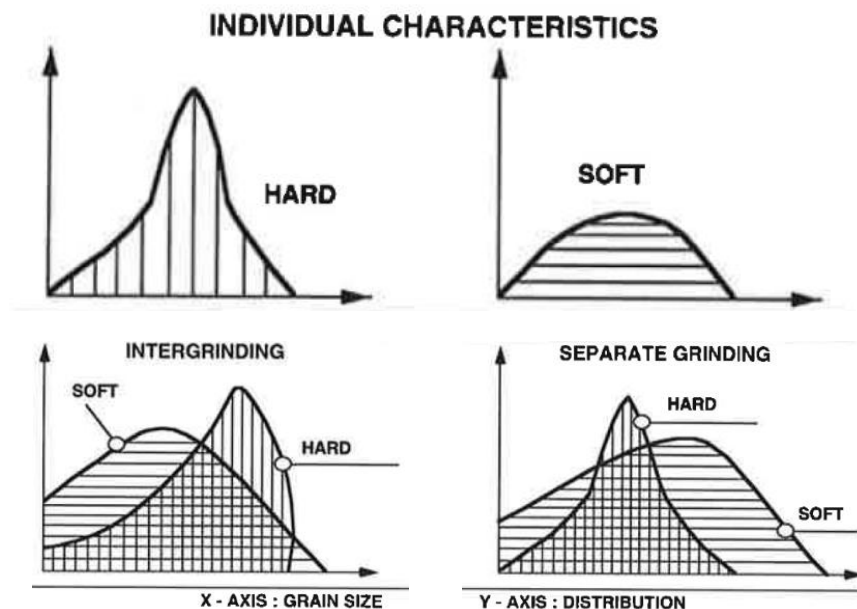


Bild 3-9 Korngrößenverteilung bei der Zementmahlung. Oben: Typische Verteilung harter und weicher Komponenten bei der separaten Mahlung. Unten: Ergebnis der Korngrößenverteilungen bei gemeinsamer Mahlung bzw. separater Mahlung und Mischung [Mit 1996]

Um die inneren Korngrößenverteilungen der Bestandteile bei der gemeinsamen Vermahlung steuern zu können, wurde das Verfahren der getrennten Vermahlung der Hauptbestandteile entwickelt. Hierbei können einzelne Bestandteile (z.B. Hüttensand oder Kalkstein) in effizienten Mahlanlagen gemahlen und anschließend mit dem gemahlenen Klinker vereinigt werden. Die Eigenschaften von Zementen, die nach diesem Verfahren hergestellt werden, unterscheiden sich nicht von Zementen, die auf nur einer Kugelmühle erzeugt wurden, wenn beide die gleiche Korngrößenverteilung aufweisen [Mül 2000]. Werden jedoch höhere Feinstanteile verwendet, kann der Wasseranspruch durch die breitere Korngrößenverteilung und eine höhere Packungsdichte reduziert werden. Bei Verwendung höherer Anteile feinsten hydraulischer oder latent-hydraulischer Bestandteile kann auch die Festigkeitsentwicklung profitieren [Tre; Lud 2001]. Für unterschiedliche Mahlgüter eignen sich unterschiedliche Mahlverfahren. Hüttensand und Kalkstein lassen sich in Vertikal-Wälzmühlen gut auf hohe Feinheiten aufmahlen, wobei das Material in diesem Mühlentyp besonders gut getrocknet werden kann. Die Mahlung von Zementen in Vertikal-Wälzmühlen führt bei höheren Feinheiten oft zu Vibrationen im Betrieb. Die im Vergleich zur Kugelmühle hohe Energieeffizienz kann so genutzt werden. Auch die Mahlung von Hüttensand in Gutbett-Walzenmühlen ist mit besonders hoher Effizienz möglich. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Mahlhilfsmitteln durch die getrennte Mahlung um bis zu 25 % reduziert werden kann [Tre; Lud 2001].

3.5 Bedeutung von Agglomerationen

"Agglomerieren als Oberbegriff für die Verfahren der mechanischen Kornvergrößerung meint das Zusammenlagern und Aneinanderbinden von feindispersen festen Primärpartikeln zu größeren Teilchenverbänden, den Agglomeraten" [Pah 1991]. Bei Mahlprozessen tritt dieser Effekt unerwünscht mit sinkender Partikelgröße auf. Hierbei vereinigen sich Primärpartikel durch interpartikuläre Anziehungskräfte (z.B. van-der-Waals-Kräfte und elektrostatische Kräfte) zu Sekundärpartikeln [Rum 1958]. Mit sinkender Partikelgröße nimmt der Einfluss der van-der-Waals-Kräfte und der elektrostatischen Anziehungskraft im Vergleich zur Gewichtskraft zu (siehe auch **Bild 3-10**). Beispielsweise ist bei einem Partikel von 1 μm die Anziehungskraft um den Faktor 10^6 höher als die der Gewichtskraft [Rim; Dem; Bow 1994]. Hierdurch gehen die Partikel eine später relativ schwer zu trennende Verbindung ein.

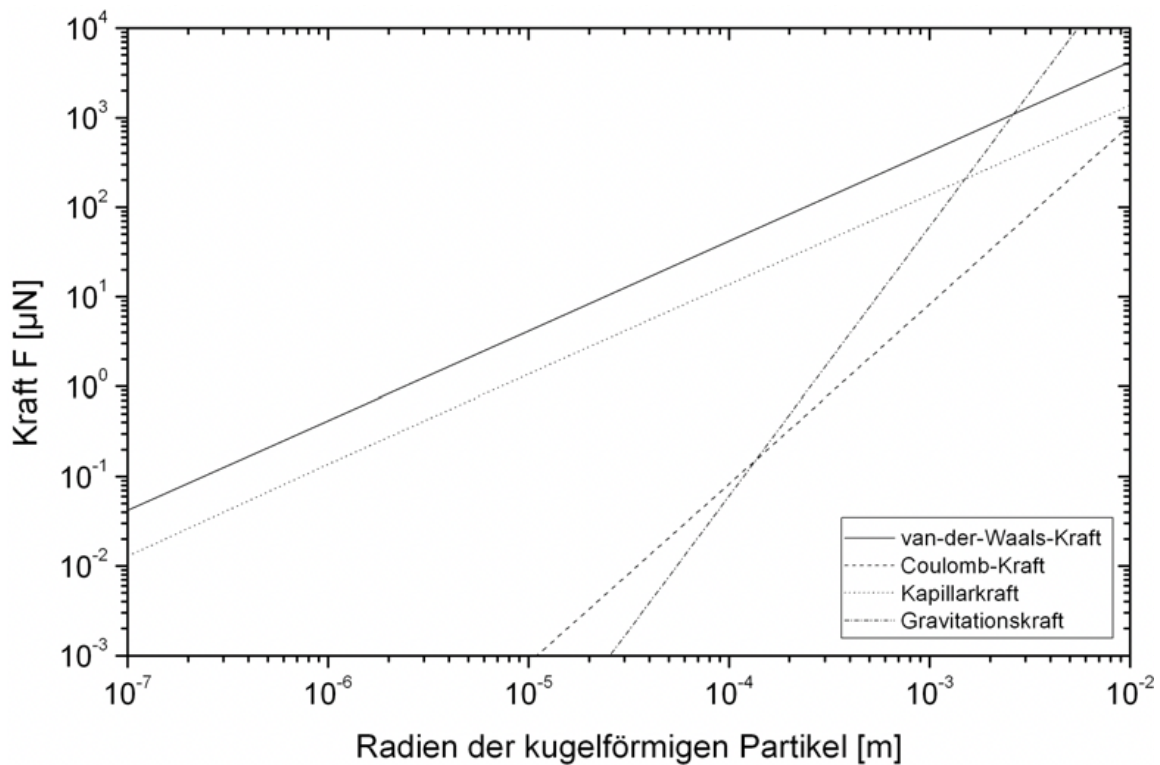


Bild 3-10 Interpartikuläre Kräfte [Zim; Ebe; Mey 2004]

Agglomerationen des Mahlguts in Kugelmøhlen zeigen sich oft in Form von Verpelzungen der Mahlkörper und Anlagerungen an den Mahlrauminnenelementen. Diese Anlagerungen können die Mahlleistung der Møhle stark reduzieren. Sind sehr feine Partikel in der Møhle agglomeriert, müssen die Sekundärpartikel vor der eigentlichen Zerkleinerung aufgespalten werden. Auch kann es zu Verformungen der Sekundärpartikel kommen. Die hierfür nötige Energie steht folglich nicht mehr für die Beanspruchung der Primärpartikel zur Verfügung. Als Konsequenz kann der Durchsatz reduziert werden, wodurch der spezifische Energiebedarf der Mahlanlage deutlich steigt. Bei starker Agglomeration des Møhlenausgangsguts können die im Sieb auftretenden Kräfte die Agglomerate unter Umständen nicht ausreichend auflösen. Die Sekundärpartikel werden in diesem Fall fälschlicherweise in die Møhle rezirkuliert und werden erneut beansprucht. Dieser Materialanteil wird mehrfach beansprucht, obwohl die Primärpartikel bereits die notwendige Produktfeinheit erreicht haben. Dies ist ein Grund für die Übermahlung von Mahlgut. Wenn das Siebaufgabegut einen geringeren Feinstanteil und damit auch weniger übermahltes Gut enthält, sind auch weniger Agglomerate und eine dementsprechend bessere Siebteffizienz zu erwarten.

Um Agglomerationen und das Verpelzen der Mahlkörper zu reduzieren wird die Kugelcharge in Kugelmøhlen meist mit Wasser gekøhlt. Häufig werden auch Mahlhilfsmittel genutzt, um die Oberflächenenergie der Partikel durch verschiedene Additive zu

verringern. Die Additive wirken in der Mühle, aber auch im Sieb. Mahlhilfsmittel können zudem die Fließfähigkeit des Mahlguts erhöhen [Fis 1967].

Die Agglomeration von Partikeln wirkt sich zudem auf die Raumausfüllung des Partikelkollektivs aus. Feinstfraktionen kleiner 10 μm weisen dabei deutlich geringere Raumausfüllungen auf als gröbere Materialien [Pal 2009]. Untersuchungen haben gezeigt, dass Zementpartikel innerhalb eines Agglomerates bis zu 5 Stunden nach Wasserzugabe in einem unhydratisierten Zustand verbleiben können. Durch schlechte Vermischung und nicht aufgelöste Agglomerate kann es zur Bildung von Fehlstellen kommen. [Yan; Jen 1995]

3.6 Feinstzerkleinerung

Bei Feinheiten unterhalb von 20 μm stagniert der Zerkleinerungsfortschritt in Kugelmøhlen häufig. Die Mahlung von besonders feinen Zementen in konventionellen Anlagen weist einen sehr hohen spezifischen Energiebedarf auf. Ursächlich hierfür sind unter anderem weniger Fehlstellen im Mahlgut, nicht ausreichende Beanspruchungsintensität sowie zunehmende Agglomerationsneigung [Sch 1971]. In Kugelmøhlen, wie sie die Zementindustrie verwendet, werden im Verhältnis zu den dort erzielten Partikelgrößen sehr große Mahlkörper eingesetzt. Es ist bekannt, dass die Feinvermahlung mit kleineren Kugeln, aufgrund der höheren Anzahl von Kontakten zwischen den Kugeln, bis zu einem gewissen Maß effektiver sein kann als die Mahlung mit großen Kugeln [Fle 2014]. Oft wird die Kugelgröße nicht weiter reduziert, um sicherzustellen dass Überkorn ausreichend zerkleinert werden kann.

In vielen Industriezweigen (z.B. Batterie-Aufbereitung, Pharmazie, Keramik) sind bereits Erfahrungen mit Feinstmøhlen vorhanden, jedoch oft nur mit vergleichsweise geringen Durchsätzen. Für die industrielle Zementmahlung gibt es nur wenige Erfahrungen. Für einen industriellen Einsatz ist es vor allem erforderlich, dass die Anlagen eine ausreichende Produktionskapazität aufweisen. Eine durchschnittliche Mahlanlage zur Zementmahlung in Deutschland verfügt über eine Produktionskapazität von etwa 40 t/h [Syn 2018]. Feinstmahlanlagen mit geeigneter Kapazität, um einen Teil der nötigen Produktionskapazität bereitzustellen, sind am Markt bereits verfügbar. Der parallele Betrieb verschiedener Feinstmøhlen ist ebenfalls möglich.

3.6.1 Definition des Feinstbereichs

Für den Feinstbereich gemahlener Stoffe gibt es in der Literatur unterschiedliche Definitionen. Teilweise werden die Mahlverfahren nach der durch sie maximal erreichbaren Feinheit unterteilt. Hier werden neben dem Mahlen (50-500 μm) sowohl das Feinmahlen (5-50 μm) als auch das Feinstmahlen (<5 μm) genannt, wobei diese Grenzen physi-

kalisch nicht zu begründen sind [Pah 1991]. Andere Quellen nutzten den Anteil der Partikel in der Korngrößenverteilung kleiner 80 % zur Charakterisierung des Produktes und unterteilen dementsprechend (siehe **Bild 3-11**). In einem sehr feinen Bereich, hier bei einem Durchgang von 80% unter etwa $2,3\ \mu\text{m}$, ändert sich die Steigung der dargestellten Gerade und die Zerkleinerung wird zunehmend energieintensiver. Dies wurde auch in anderen Untersuchungen beobachtet und kann auf die steigende Partikelfestigkeiten und eine Verdrängung der kleinen Partikel in der Beanspruchungszone zurückgeführt werden [Sch 1988]. Auch die Unterteilung der Mahltechnik auf Basis ihrer Aufgabegutfeinheit ist üblich [Sti 1994].

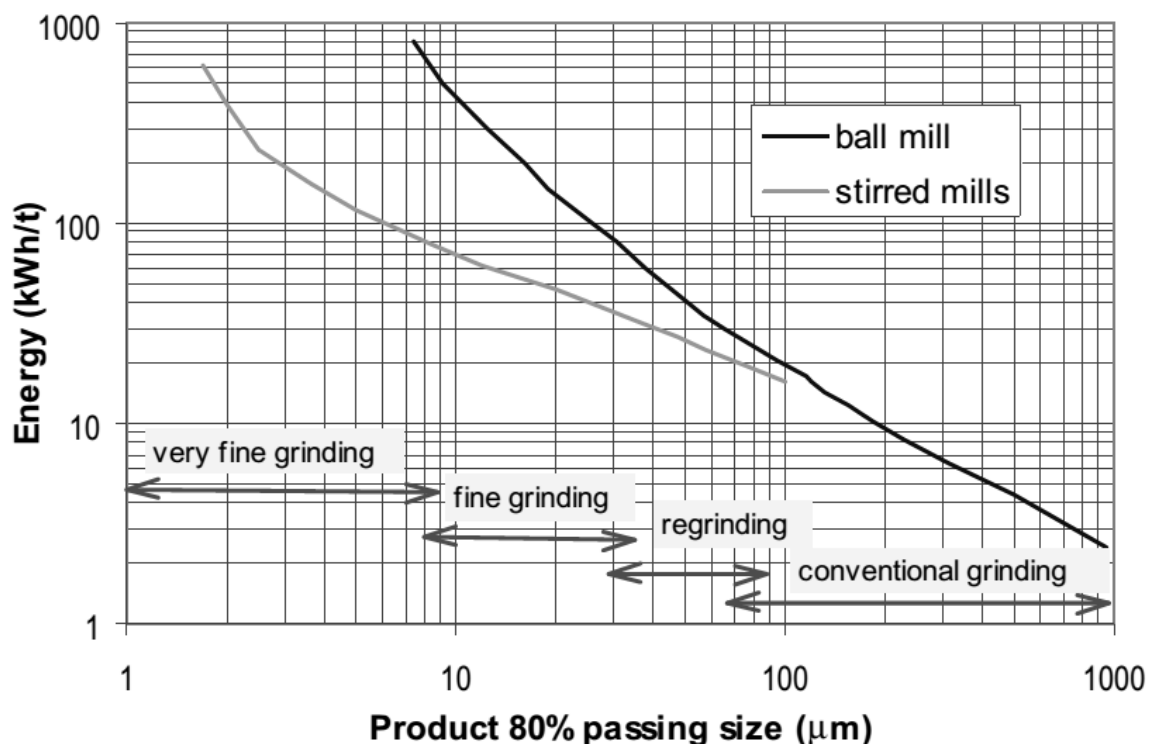


Bild 3-11 Vergleich zwischen einer Kugel- und einer Rührwerkskugelmühle hinsichtlich der Partikelgröße und des spezifischen Energiebedarfs [Jan 2003]

Bei einem Expertentreffen der ECRA (European Cement Research Academy) wurde für Zemente ein Feinstbereich auf kleiner $5\text{-}8\ \mu\text{m}$ definiert. Klinker-Partikel dieser Größenordnung gelten als hauptverantwortlich für die Frühfestigkeitsentwicklung. [ECR 2015]

Zur Beschreibung der Feinheit der hergestellten Zwischenprodukte wird in dieser Arbeit eine angepasste Definition der Feinheitsbereiche verwendet. Diese findet sich im Anhang Kapitel F.

3.6.2 Feinstmahlanlagen

Feinstmahlanlagen werden entweder mit einer Suspension (Nassmahlung) oder trocken betrieben. In einer Studie der ECRA wird eine umfassende Übersicht über die verfügbare Zerkleinerungstechnologie gegeben [ECR 2015]. Hier werden auch zahlreiche Feinstmahlverfahren aufgeführt. Darunter befinden sich auch Mahlanlagen, die aktuell nur im Labormaßstab oder im diskontinuierlichen Betrieb (z.B. Planetenkugelmühle) funktionieren. Diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Nassmahlverfahren erleichtern das Desagglomerieren des Mahlgutes durch das Benetzen der Oberflächen. Besonders feine Materialien stellen hohe Anforderungen an den Materialtransport innerhalb der Mahlanlage und an die Transportwege. Viele Feinstmahlanlagen werden aus diesem Grund mit einer Suspension betrieben, welche die Dispergierung und den Transport erleichtert. Die bei Trockenmahlverfahren nötige Arbeit zum Aufbrechen der Agglomerate kann bei der Nassmahlung direkt für die eigentliche Zerkleinerung des Mahlgutes genutzt werden. Die Effizienz der Nassmahlung kann etwa 20-25 % über der Effizienz der Trockenzerkleinerung liegen [Bek 1981]. Da die Nassmahlung hydraulisch erhärtender Bindemittel problematisch ist, wurde diese in der Zementmahlung bislang großtechnisch nicht etabliert.

Die Trockenvermahlung in Kugelmühlen ist in der industriellen Zementherstellung zum Erreichen hoher Fertiggutfeinheiten das bislang gängige Verfahren. Die verfügbare Mahltechnik kann entsprechend ihrer nötigen Aufgabekorngröße und der durch sie erreichbaren Produktfeinheit unterteilt werden. Während es für die Grob- und Feinzerkleinerung ausreichend Erfahrung mit den verfügbaren Mahlanlagen gibt, gibt es nur wenig Erfahrung mit trocken arbeitenden Feinstmahlanlagen. Neikov et al. unterteilen Anlagen für den Feinstbereich in die Kategorien Rührwerkskugelmühlen, Vibrationsmühlen und Strahlmühlen (**Bild 3-12**).

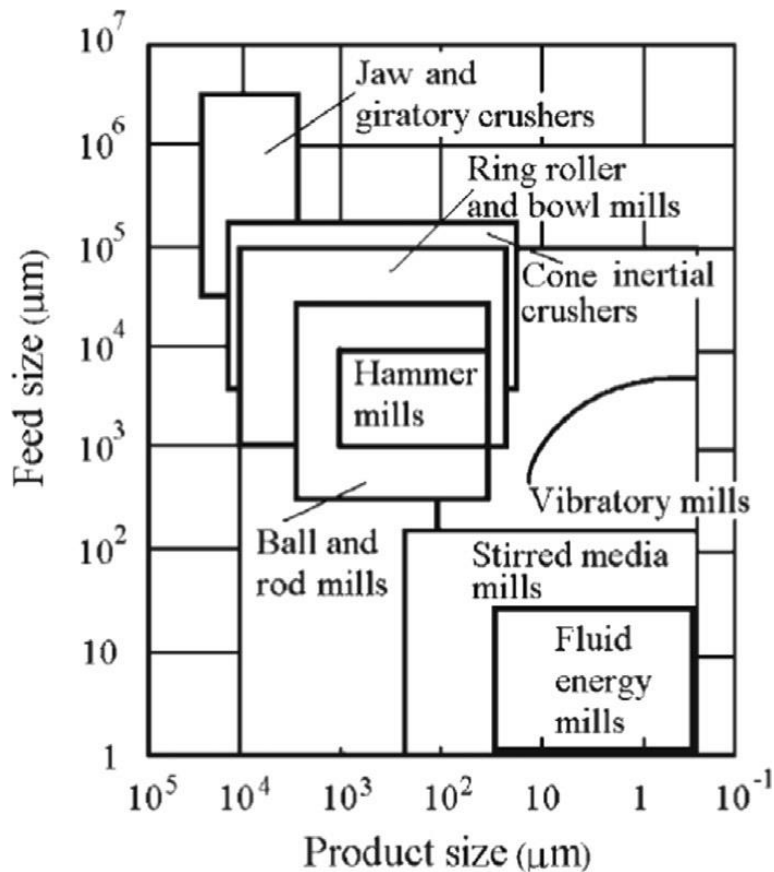


Bild 3-12 Aufgabe- und Produktfeinheiten von Mahlanlagen [Nei; Nab; Mou; Gop; Fri 2009]

Verschiedene Bauformen der Strahlmühle sind als Feinstmühlen auf dem Markt verfügbar. Das Aufgabegut wird hier durch einen Volumenstrom mit sehr hoher Geschwindigkeit beschleunigt. Diese Gasströme können gegeneinander (Gegenstrahl) oder auf eine Prallplatte gerichtet sein. Diese Anlagen können ohne starke Kontaminationen des Mahlgutes extrem hohe Feinheiten produzieren und benötigen in diesem Fall auch außerordentlich viel Energie. Der Durchsatz dieser Anlagen liegt im Bereich von 1 t/h. [Sti 1994] Wobei durch Strahlmühlen Produkte mit einem Maximalkorn kleiner 10 µm und engen Korngrößenverteilungen [Pal; Azi; Hus; Has 2008] [Xue; Zho 2009] hergestellt werden können. Zemente und deren Hauptbestandteile konnten in Versuchen mit einer Strahlmühle auf eine mittlere Korngröße (D_{50}) von 4 µm und weniger zerkleinert werden. Mit steigender Feinheit konnte hier vor allem die Frühfestigkeit erhöht werden. [Sun; Hoh; Cao 2013]

Vibrationskugelmühlen (auch Schwingmühlen) bestehen aus einem vibrierenden oder schwingenden Mahlraum, in dem sich die Mahlkörper bewegen. Diese Mühlen erreichen allerdings nur sehr geringe Durchsätze verbunden mit hohen Verschleißraten. Für Quarz werden Durchsätze mit bis zu 2 t/h ($100\% < 40\text{ µm}$, 27 kWh/t) genannt, wobei bei einer anderen Produktfeinheit für Kalkstein ein Durchsatz von 0,18 t/h ($100\% < 2\text{ µm}$) bei 61 kWh/t erreicht werden kann [Kur; Goc 1997].

Für einige wenige Feinstmühlen-Typen gibt es bereits kleintechnische Erfahrungen bei der Mahlung von Zement und dessen Hauptbestandteilen. Besonders die trocken arbeitende horizontale Rührwerkskugelmühle wurde intensiv im Bereich der Zementmahlung untersucht [Alt 2013]. Horizontal wie vertikal ausgerichtete Rührwerkskugelmühlen (**Bild 3-13**) arbeiten durch potentialgetriebenen Materialtransport oder mit einem Transportvolumenstrom. Die Mahlkammer ist dabei stationär angeordnet und die Relativbewegung der Mahlkugeln (bei trocken betriebene Rührwerkskugelmühlen: etwa 6 mm Durchmesser) erfolgt durch einen Rotor, wodurch die Beanspruchungsintensität gut eingestellt werden kann.

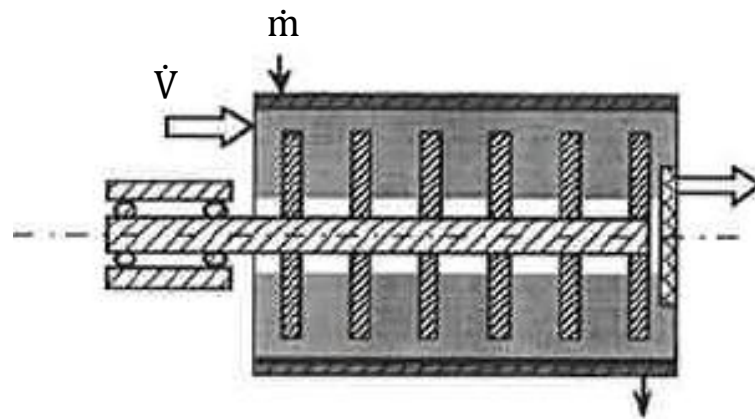


Bild 3-13 Schematische Darstellung einer Scheiben-Rührwerkskugelmühle [Kar; Mül; Pol 1996]

In Abhängigkeit der Produkt- und Aufgabefeinheit sowie des verwendeten Aufgabematerials liegen typische Durchsatzmengen von vertikalen Rührwerkskugelmühlen zwischen 600 kg/h (Kalkstein 99,5 % < 5 μm , MaxxMill® [Fa. Eirich 2017]). Für Anwendungen im Bereich Zement wird ein Durchsatz von bis zu 15 t/h genannt [Sac 2000]. Versuche der Fa. Eirich haben ergeben, dass sehr feine Zemente von bis zu $D_{50\%}=1,4 \mu\text{m}$ hergestellt werden können, wobei im Versuch der Durchsatz der Mühle 320 kg/h betrug ($\sim 550 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$ für den Mahlkreislauf). Wird ein gröberes Produkt ($D_{50\%}=2,9 \mu\text{m}$) hergestellt, steigt der Durchsatz auf 760 kg/h ($\sim 180 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$ für den Mahlkreislauf). [Fa. Eirich 2004] Horizontale Rührwerkskugelmühlen werden mit einem Mahlkammervolumen von bis zu 3000 l angeboten. Hier können Durchsatzleistungen von bis zu 19,2 t/h (Kalkstein, $D_{50\%} < 8 \mu\text{m}$, Netzsch SpheRho® [Fa. Netzsch 2017]) erreicht werden.

Die Betriebsweise und die Mahlrauminnenelemente von Rührwerkskugelmühlen haben auch Einfluss auf die Leistung der Mühlen. Besonders die Änderung des Rührwerkstyps kann einen entscheidenden Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf haben [Alt; Ben; End 2014]. Zudem wird über den Einfluss der Kugelgröße und der Rührwerksgeschwindigkeit auf den sich einstellenden Volumenstrom berichtet [Rác; Tam 2018]. Arbeiten an kleintechnischen Rührwerkskugelmühlen zeigen wesent-

liche Erkenntnisse zum Einfluss der Fließfähigkeit durch Mahlhilfsmittel sowie deren Einfluss auf die Effizienz bei der Mahlung mit verschiedenen Betriebsparametern [Prz; Bre; Kwa 2018].

Sepulveda hat Vibrationskugelmøhlen, Kugelmøhlen (nass, trocken) und Røhrwerkskugelmøhlen (nass) bei der Mahlung von Chalkopyrit (Møhshårte 3,5-4 [Ant; Bid; Bla; Nic 2001]) hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs und erreichbarer Feinheit ($D_{50\%}$) gegenøbergestellt (**Bild 3-14**) [Sep 1981]. Es zeigt sich ein deutlicher energetischer Vorteil bei der Mahlung in der Røhrwerkskugelmøhle, besonders bei hohen Produktfeinheiten. Darøber hinaus kann mit der Røhrwerkskugelmøhle die høchste Produktfeinheit im Gesamtvergleich erreicht werden.

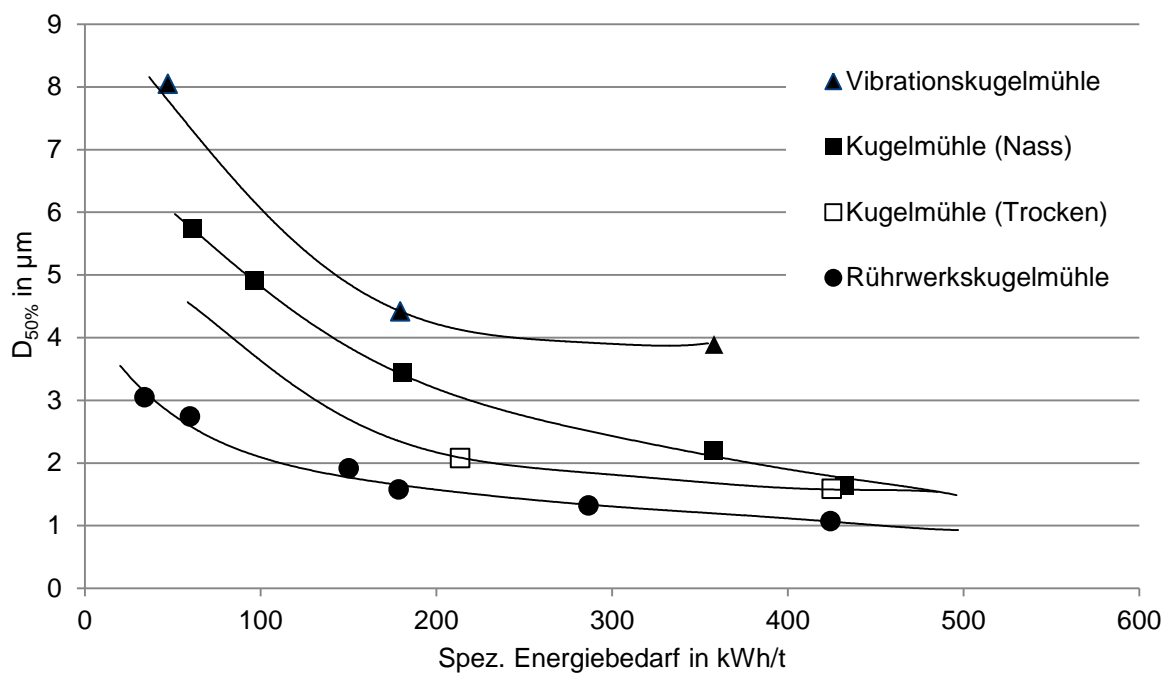


Bild 3-14 Vergleich verschiedener Feinstmahlsysteme [Sep 1981]

4 Darstellung des Versuchsprogramms

In **Tabelle 4-1** findet sich eine Übersicht der in den beiden Mahlschritten (MS) hergestellten Zwischenprodukten sowie des Versuchsprogramms, welches in zwei Arbeitsschritte unterteilt wurde.

Tabelle 4-1 Kurzzusammenfassung des Versuchsumfangs

1. Kleintechnische Untersuchungen		
Bezeichnung der verwendeten Klinker		1, 2
1. MS	4 Zwischenprodukte je Klinker (VRM)	2200, 2600, 3600 und 4400 cm ² /g nach Blaine
2. MS	17 feinstgemahlene Zwischenprodukte je Klinker (diskontinuierliche Rührwerkskugelmühle)	Siehe Tabelle A-13-8 , Tabelle A-13-13
Nachgebildete Produkte (siehe Punkt 1): Mittlere Zemente: CEM I 32.5, CEM I 42.5, CEM I 52.5 Klinkermehl aus Referenzmahlung mit einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle		
2. Versuche in Industrieumgebung		
Bezeichnung des verwendeten Klinkers		3
1. MS	3 Zwischenprodukte (Argo-Mühle)	1690, 1880, 2400 cm ² /g nach Blaine
2. MS	Feinstgemahlene Zwischenprodukte (Netzsch-Rührwerkskugelmühle) 8 (Durchlaufmahlung) 8 (Umlaufmahlung)	Siehe Tabelle A-13-27
Nachgebildete Referenz-Korngrößenverteilungen (siehe Punkt 2): Werkszemente: CEM I 42,5 N, CEM I 52,5 N, CEM I 52,5 R (siehe Tabelle A-13-28)		

1. Untersuchung der Zementeigenschaften im kleintechnischen Maßstab

Um den Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Zementeigenschaften gut darstellen zu können, wurden zwei Klinker unterschiedlicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung (Klinker 1 und Klinker 2, siehe **Tabelle 6-1** und **Tabelle 6-2**) in einer kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle (VRM) vorge-mahlen und anteilig in einer diskontinuierlich betriebenen Rührwerkskugelmühle nachzerkleinert. So wurden für beide Klinker je 4 Zwischenprodukte im 1. Mahlschritt und daraus je 17 Zwischenprodukte im 2. Mahlschritt hergestellt. Durch Mischung der Klinkermehle wurden die Korngrößenverteilungen von Referenz-Produkten nachgebildet, wobei die Mischungsverhältnisse vorher berechnet wurden.

Zum Darstellung der Korngrößenverteilungen der Mischungen und der Referenz-Zemente wurden die Sulfatträger in den Korngrößenverteilungen der Mischungen wie folgt berücksichtigt:

- Referenz-Klinkermehle mit besonders hoher Feinheit wurden in einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle hergestellt, wobei der direkte Vergleich mit den Mischungen möglich war und der Sulfatträger in Mischung und Referenz nachträglich zugefügt wurde.
- Bei Vergleich mit mittleren CEM I-Zementen war die Korrektur der Korngrößenverteilung um die Korngrößenverteilung der Sulfatträger notwendig, die nachher in die Mischung eingehen.

Die Zementeigenschaften der gemischten Klinkermehle mit den Sulfatträgern wurden anschließend in Mörtelversuchen bestimmt und den Referenzmahlversuchen aus der Kugelmühle gegenübergestellt.

2. Bewertung des spezifischen Energiebedarfs durch Verwendung von Mahlanlagen in Industrieumgebung

Für diese Untersuchungen wurde Klinker 3 aus industrieller Produktion verwendet, dieser weist geringe Schwankungen der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung auf. Historische Daten haben gezeigt, dass diese Schwankungen auch in der Vergangenheit auf einem vergleichbar geringen Niveau waren. Durch die Verwendung dieses Klinkers bleiben auch Folgeprojekte mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar. Darüber hinaus wurde durch die Verwendung eines weiteren Klinkers eine breitere Datenbasis geschaffen und so die Eignung des Konzepts weiter erhärtet.

Zur Bewertung des spezifischen Energiebedarfs der separaten Feinstmahlung wurden aus Klinker 3 Mehle in Mahlanlagen im Technikumsmaßstab (Argo-Mühle und Netzsch-Rührwerkskugelmühle) hergestellt. Die Mischungsverhältnisse wurden berechnet, wobei die Korngrößenverteilung der genutzten Sulfatträger vorher von der Referenz-Korngrößenverteilung abgezogen wurde. Die Klinkermehle wurden durch Mischung in einem Taumelmischer mit Sulfatträgern vereinigt. In Mörteluntersuchungen wurden die Mischungen hinsichtlich ihrer Festigkeitsentwicklung untersucht.

Da in diesen Untersuchungen die Sulfatträger nicht gemeinsam mit dem Klinker vermahlen wurden, ist anzunehmen, dass der spezifische Energiebedarf sinkt, wenn bei gleicher Produktfeinheit (leicht mahlbare) Sulfatträger enthalten sind.

5 Trockene Feinstzerkleinerung von Zementhauptbestandteilen

5.1 Charakterisierung von Feinstanteilen durch Lasergranulometrie

Um den Einfluss der verwendeten Auswertemethode auf das Messergebnis darzustellen, wurden Proben in einem Cilas 1190LD-Lasergranulometer gemessen und mit der Fraunhofer-Näherung sowie der Mie-Theorie berechnet. Als Dispergierungsmittel wurde Ethanol verwendet. Bei der Berechnung nach Mie wurde ein Brechungsindex von $1,68 \pm 0,1i$ angenommen [Cil 2017].

Nach ISO 13320-1999 sollen Partikelkollektive unter $20\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Konzentration von 15 Vol.-% in der Suspension analysiert werden. Proben, die größtenteils Partikel über $20\text{ }\mu\text{m}$ enthalten, sollten bei einer Konzentration von etwa 35 Vol.-% analysiert werden. Der Einfluss der jeweiligen Konzentration im Dispergiermedium konnte durch Untersuchungen bestätigt werden. Als Versuchsmaterialien wurden unterschiedlich feine Klinkermehle in einer Rührwerkskugelmühle ermahlen. Es zeigte sich, dass bei höherer Konzentration kleinere Lageparameter gemessen werden (siehe auch **Bild 5-1** links). Ein systematischer Einfluss auf das gemessene Maximalkorn der Proben konnte nicht festgestellt werden. Aufgrund der höheren Anzahl gemessener feiner Partikel im Kollektiv wird die Korngrößenverteilung insgesamt breiter (**Bild 5-1** rechts).

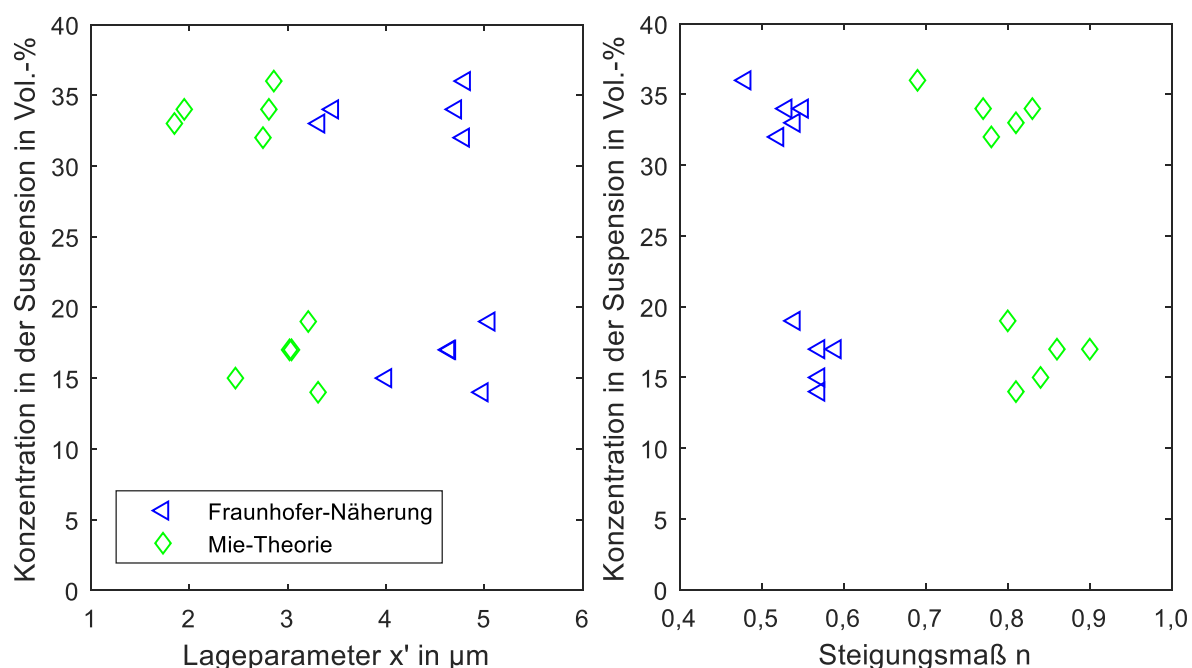


Bild 5-1 Einfluss der Konzentration im Dispergiermedium und der verwendeten Auswertungstheorie auf das Messergebnis von fünf unterschiedlichen Proben

Eine Auswertung der Datenbank des verwendeten Lasergranulometers hat ergeben, dass bei CEM I-Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 im Mittel 52 % der Probe kleiner als 20 μm ist. Bei CEM I-Zementen der höheren Festigkeitsklassen steigt dieser Anteil aufgrund der höheren Feinheiten (CEM I 42,5: 64 %, CEM I 52,5: 78 %), wobei viele CEM I 52,5-Zemente bereits zu 100 % kleiner als 20 μm sind. Da viele Zemente einen hohen Materialanteil kleiner als 20 μm aufweisen, sollten entsprechend den Vorgaben in ISO 13320-1 Konzentrationen von etwa 15 Vol.-% in der Suspension verwendet werden. Für die Qualitäts- und Produktionsüberwachung ist die Verwendung möglichst konstanter Konzentrationen wichtig. Da die Anwendung der Mie-Theorie den Brechungsindex des Materials voraussetzt, ist es aus praktischen Gründen schwierig, das Verfahren für Zemente und deren Hauptbestandteile anzuwenden. Zudem weisen gewöhnliche Zemente vergleichsweise geringe Feinstanteile auf; daher ist die Anwendung dieser Theorie hier nicht nötig.

Die durch ein Ultraschallbecken in die agglomerierten Partikel eingetragene Energie wird genutzt, um die Sekundärpartikel aufzuspalten und so die Analyse der Korngrößen der Primärpartikel zu ermöglichen. Um den Einfluss der Dispergierung auf das Messergebnis darzustellen, wurden die Korngrößenverteilungen von 13 Proben gemessen und die eingetragene Energie variiert.

Ohne Dispergierung im Ultraschallbad gemessen Proben wurden am größten dargestellt. Hier sind noch signifikant viele Sekundärpartikel vorhanden. Die in **Bild 5-2** dargestellten Dichteverteilungen zeigen eine Unterrepräsentation des Feinstbereichs verglichen mit den dispergierten Proben. Die Dauer der Dispergierung im Cilas-Lasergranulometer betrug 20, 40 und 60 Sekunden. Dies entspricht einer in die Suspension eingetragenen Energie von 1000, 2000 und 3000 J. Es zeigt sich ein vernachlässigbar kleiner Unterschied zwischen den Messungen. Durch Dispergierung in einem externen Ultraschallbad (200 W je 300 Sekunden, dies entspricht 60000 J zzgl. 3000 J aus der internen Dispergierung) konnten deutlich mehr Agglomerate aufgespalten werden. Vor allem die höhere Intensität der externen Dispergierung ist für die bessere Aufspaltung der Sekundärpartikel verantwortlich. Um mögliche Agglomeratbildungen bei der nachfolgenden Messung ausschließen zu können, wurden alle Proben, die in dieser Arbeit analysiert wurden, 300 Sekunden bei 200 W (extern) vordispergiert. Die Korrelation von Produkteigenschaften mit den Korngrößenverteilungen bei unterschiedlicher Dispergierung sollte daher auch allgemein untersucht werden, dies ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

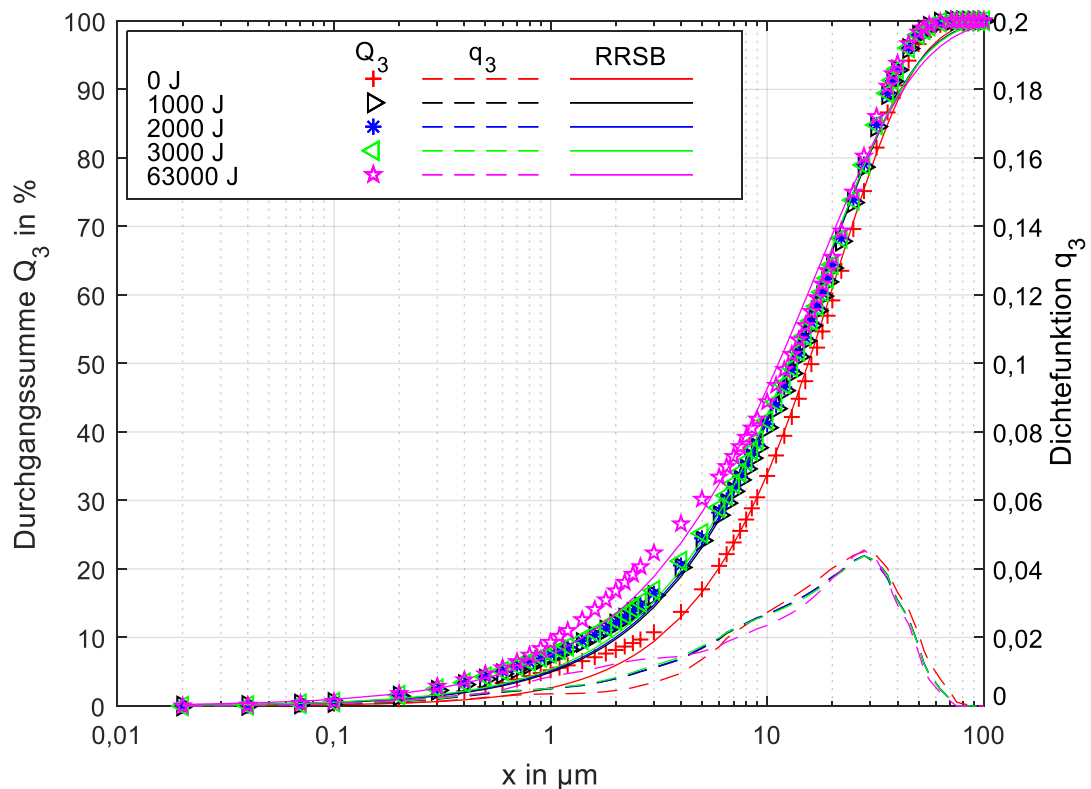


Bild 5-2 Einfluss der Leistung der Ultraschalldispargierung auf das Messergebnis bei der Nassmessung

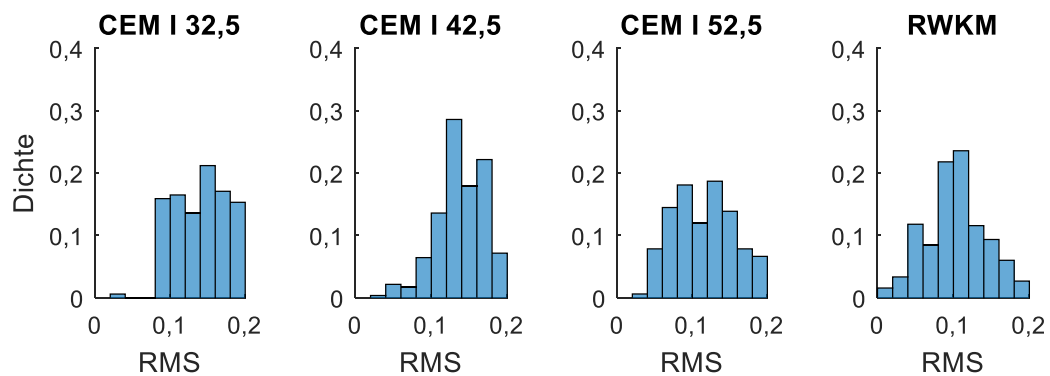
Um zu bewerten, wie gut die RRSB-Funktion an feinstgemahlene Produkte angenähert werden kann, wurde die Datenbank des verwendeten Lasergranulometers ausgewertet. Die Eignung der RRSB-Funktion wurde bestimmt, indem die quadratischen Mittelwerte (RMS) zwischen der RRSB-Funktion und den Messpunkten von 600 CEM I-Zementen, gemahlen in Kugelmøhlen, und Hüttensand gemahlen in einer Røhrwerkskugelmøhle berechnet wurden (**Bild 5-3**). Die RRSB-Funktionen wurden durch lineare Regression (oben) und durch ein nicht-lineares Approximationsverfahren (Downhill-Simplex-Verfahren, unten) angenähert. Das lineare Regressionsverfahren [Sch 1999] und das Downhill-Simplex-Verfahren [Lag; Ree; Wri; Wri 1998] wurden bereits hinreichend beschrieben.

Bild 5-3 zeigt die Feinheitsabhängigkeit der RRSB-Funktion wenn die lineare Regression (oben) verwendet wird. Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 sind gewöhnlich gröøer als die der anderen Festigkeitsklassen. Obwohl das Maximum über alle Festigkeitsklassen etwa gleich ist, zeigt sich bei CEM I 32,5-Zementen ein Minimum von etwa 0,1. Durch Verwendung des Downhill-Simplex-Verfahrens (unten) wird eine bessere Annäherung der RRSB-Funktion erreicht. Das Maximum und das Minimum der Verteilung sinken deutlich. Die RRSB-Funktion eignet sich besser, wenn Korngröøenverteilungen mit höheren Feinanteilen dargestellt werden.

Um die Eignung der RRSB-Funktion für Produkte aus der Rührwerkskugelmühle zu beurteilen, wurden die Korngrößenverteilungen von etwa 470 Hüttensandmahlungen, gemahlen auf unterschiedliche Feinheiten in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle (RWKM) dargestellt (**Bild 5-3** links). Da die verwendete Rührwerkskugelmühle recht breite Korngrößenverteilungen erzeugt, eignet sich die RRSB-Funktion gut zur Charakterisierung.

Die Güte der Approximation hängt stark vom gewählten Verfahren ab. Der direkte Vergleich zeigt, dass in nahezu allen Fällen der RMS bei Verwendung des Downhill-Simplex-Verfahrens wesentlich kleiner ist als bei Verwendung des linearen Verfahrens. Daher eignet sich das Downhill-Simplex-Verfahren besonders gut um die RRSB-Parameter zu berechnen.

Lineare Regression



Downhill-Simplex-Verfahren

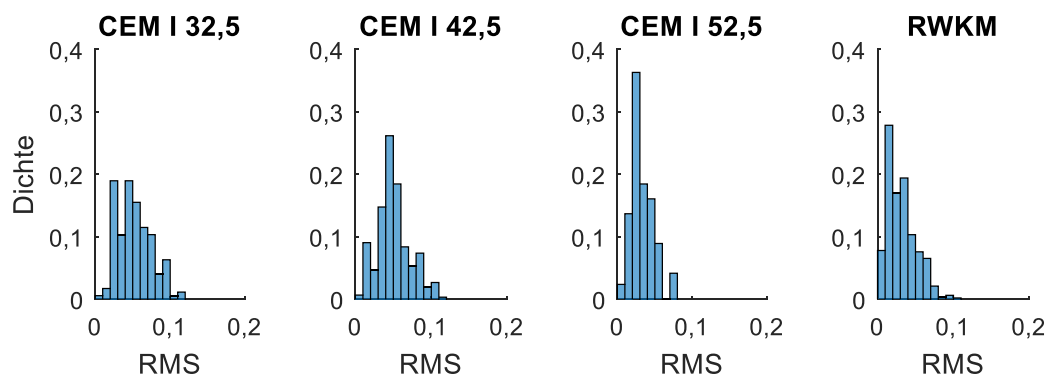


Bild 5-3 Darstellung der Eignung der RRSB-Funktion anhand des quadratischen Mittelwerts (RMS) zwischen der RRSB-Funktion und den Messpunkten. Verwendung der linearen Regression (oben) und des Downhill-Simplex-Verfahrens (unten)

Die grafische Gegenüberstellung der RRSB-Parameter zeigt den Einfluss des verwendeten Approximationsverfahrens (**Bild 5-4**). Wird der Lageparameter, berechnet durch beide Verfahren, gegenübergestellt, zeigt sich, dass durch Anwendung des Downhill-Simplex-Verfahrens die Materialien mit einem größerem Lageparameter beschrieben werden als bei Verwendung des linearen-Verfahrens. Mit steigender Feinheit nähern sich die Lageparameter berechnet durch beide Verfahren jedoch an. Das Steigungsmaß weist besonders bei engeren Verteilungen einen deutlichen Unterschied auf. Die Verteilungen werden bei Verwendung des linearen Ansatzes enger dargestellt als bei Verwendung des Downhill-Simplex-Verfahrens.

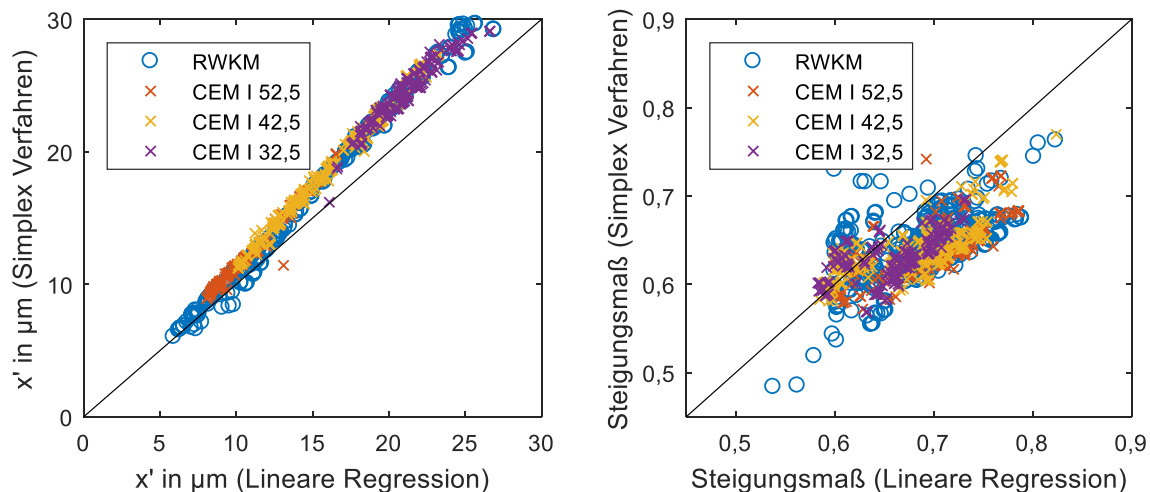


Bild 5-4 Einfluss des verwendeten Approximationsverfahrens auf die RRSB-Parameter

Da das Downhill-Simplex-Verfahren eine bessere Repräsentation der gesamten Korngrößenverteilung ermöglicht als das lineare Verfahren, wird es für weitere Berechnungen von RRSB-Funktionen verwendet.

5.2 Ansätze zur verfahrenstechnischen Optimierung trocken betriebener Rührwerkskugelmøhlen für die Zementmahlung

An die Zementmahlung werden diverse Anforderungen gestellt (z.B. Produktqualität, Zuverlässigkeit, etc.), die bei der Optimierung von Mahlanlagen berücksichtigt werden müssen. Feinstmahlanlagen, wie auch alle anderen Møhlen, sind in ihrer AufgabekorngrøÙe beschränkt. Sollen diese Anlagen in der Zementmahlung eingesetzt werden, muss die AufgabekorngrøÙe dementsprechend gering sein. Große Partikel können durch Feinstmahlverfahren nur schwer zerkleinert werden. Es bleibt Überkorn zurück, welches sich im Møhlenkreislauf anreichert und nur sehr langsam zerkleinert werden kann. Ebenso kann Überkorn die Mahlung der anderen Partikel behindern. Mahlgüter,

welche durch Hochdruckzerkleinerung im Sichterkreislauf vorgemahlen wurden, eignen sich aufgrund der engen Korngrößenverteilung besonders gut als Aufgabematerial.

Besonderen Einfluss auf die Zerkleinerung in der Rührwerkskugelmühle hat die Kugelgröße. Prziwara untersuchte den Einfluss der Kugelgröße bei der Benutzung von verschiedenen Mahlhilfsmitteln. Eine materialabhängige Kugelgröße darf den Ergebnissen der Studie zufolge nicht unterschritten werden, um eine ausreichende Beanspruchungsenergie bereitzustellen. Die effizienteste Zerkleinerung wurde in der Versuchsreihe mit einer Kugelgröße von 2-3 mm erreicht. Die Nutzung größerer wie auch kleinerer Kugeln verschlechterte den spezifischen Energiebedarf teils deutlich. [Prz; Ha; Bre; Kwa 2018]

Zur zuverlässigen Entwässerung von Gips zu Halbhydrat sind geeignete Temperaturen und Verweilzeiten nötig. In Hochdruckzerkleinerungsanlagen wird aus diesen Gründen häufig keine vollständige Gipsentwässerung erreicht. In Mahlkörpermühlen, wie Kugelmühlen, entstehen meist ausreichend hohe Temperaturen und Verweilzeiten. Ohne an dieser Stelle den Beweis zu erbringen, wird hier, aufgrund des hohen Energieeintrages in Rührwerkskugelmühlen, ebenfalls davon ausgegangen. Dies ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit und muss gesondert untersucht werden.



Bild 5-5 Zylindrische Mahlkammer (links) und die optimierte Mahlkammer mit Wellengeometrie (rechts)

Für die diskontinuierlichen Mahlversuche wurde eine horizontale Rührwerkskugelmühle verwendet, die zunächst hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs optimiert wurde. Die Mühle besteht aus einer horizontalen Mahlkammer und einem Rotor (**Bild 5-5**). Als Mahlkörper wurden Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 3 mm verwendet, welche durch den Rotor beschleunigt werden. Neben Kugel-Kugel-Interaktionen wird das Mahlgut durch Kontakte zwischen den Kugeln und dem Rotor sowie durch Reibung der Kugeln mit der Mahlkammer beansprucht. Durch die hohe Beanspruchungs-

intensität in dieser Rührwerkskugelmühle können im diskontinuierlichen Betrieb in kurzer Zeit Mahlgüter von hoher Feinheiten in ausreichender Menge gemahlen werden. Das im Rotor ausgelöste Drehmoment (M) und die Drehzahl (n) wurden mit einem kalibrierten Drehmomentenaufnehmer (Fa. Kistler Typ: 4502A20R) aufgezeichnet und in die Leistung(P) umgerechnet (**Gleichung 2**). Hieraus kann dann der spezifische Energiebedarf berechnet werden.

$$P = \frac{2 * \pi * n}{60} * M \quad \text{Gleichung 2}$$

Zunächst wurden grundlegende Zerkleinerungsversuche durchgeführt. Hierbei ist aufgefallen, dass das ursprüngliche Design des Rotors nicht optimal war [Tre 2013]. Es zeigte sich ein sehr hoher Verschleiß des Rotors und die Ausbildung von „toten Zonen“ (siehe auch **Bild 5-6** links).



Bild 5-6 Vergleich der „toten Zonen“ zwischen dem ursprünglichen Rotordesign (links) und dem neu entwickelten Design (rechts) [Tre; Fle 2015]

Durch den Verschleiß der Mahlwerkzeuge war das kontaminierte Mahlgut bereits nach kurzer Mahldauer mit dem ursprünglichen Rotor grau verfärbt und darüber hinaus stark magnetisch. Die Mahlkammer zeigte in den äußeren Bereichen der Mahlkammer „tote Zonen“, welche sowohl Mahlkörper als auch Mahlgut einschließen. Die Entwicklung eines neuen Rotordesigns zeigte eine deutliche Verbesserung (siehe auch **Bild 5-6** rechts). Hierzu wurden die mit Hartmetallplättchen aufgepanzerten Schläger durch Rundstähle ersetzt. Im ursprünglichen Design werden die Mahlkörper hauptsächlich in radialer Richtung beschleunigt. Durch Verwendung von Rundstählen sollen die Mahlkörper entsprechend ihres Kontaktpunktes mit dem Schläger in axialer Richtung abgelenkt werden (siehe auch **Bild 5-7**) [Rei 2005]. Durch die Verwendung von Halbzeugen ist der Wechsel der Rotorstäbe besonders einfach und ökonomisch. Entsprechend

hochwertige Legierungen können den Verschleiß deutlich reduzieren. Besonders die Spitze der Stäbe ist starken Belastungen ausgesetzt, da diese immer wieder mit relativ langsamen Mahlkörpern kollidiert. Nach einer Einlaufzeit bildet sich an den Spitzen eine abgerundete Geometrie aus und der Verschleiß sinkt stark.

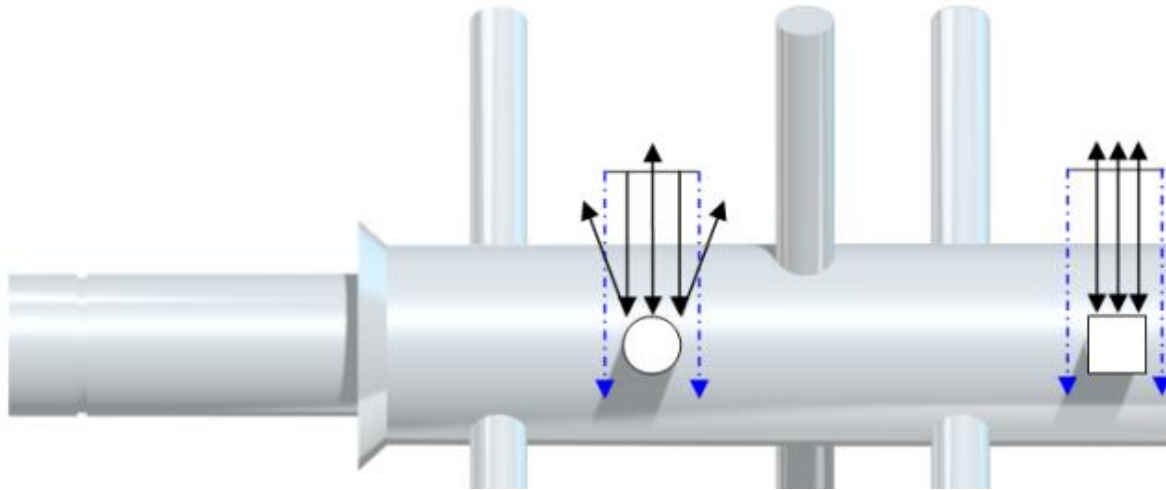


Bild 5-7 Schematische Darstellung der Kugelbeschleunigung durch das ursprüngliche Rotor-Design (rechts) und durch das optimierte Design (links) [Tre 2013]

Für die Optimierungsuntersuchungen wurde Hüttensand mit einer maximalen Aufgabekorngröße von $500\ \mu\text{m}$ verwendet. Um das energetische Optimum zu identifizieren, wurden die Betriebsparameter variiert und die Verwendung eines optimierten Mahlkammerdesigns [Rei 2005] untersucht. Bei Verwendung von zylindrischen Mahlkammern kann es zum Zentrifugieren von Mahlkörpern kommen, folglich sinkt die Energieeffizienz der Zerkleinerung. Durch eine spezielle Wellengeometrie soll die Häufigkeit der Kollisionen bei höheren Drehzahlen erhöht werden [Rei 2005].

In einem ersten Optimierungsschritt wurde die Drehzahl des Rotors der Mühle variiert (siehe auch **Bild 5-8**). Der Einfluss der Drehzahl auf den spezifischen Energiebedarf ist niedrig. Höhere Drehzahlen steigern die Zerkleinerungsleistung (gemessen an der Mahldauer) und den Verschleiß der Mahlwerkzeuge. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors wurde zwischen $7,3$ und $14,7\ \text{m/s}$ variiert. Die Mahlgutmenge betrug initial $100\ \text{g}$. Darüber hinaus wurden verschiedene Feinheiten mit jeder Versuchseinstellung durch Variation der Mahldauer hergestellt. In den dargestellten Diagrammen wurde zwischen diesen Messpunkten interpoliert, um eine mögliche feinheitsabhängige Verschiebung des Optimums identifizieren zu können. Wenn die Mahlkörper zentrifugieren, sinkt die Zerkleinerungsleistung und damit auch die Effizienz der Anlage. Bei Verwendung des Wellendesigns der Mahlkammer wurde beobachtet, dass es zu keiner Limitierung der Rotordrehzahl aufgrund des Zentrifugierens der Mahlkörper kommt. [Tre 2013]

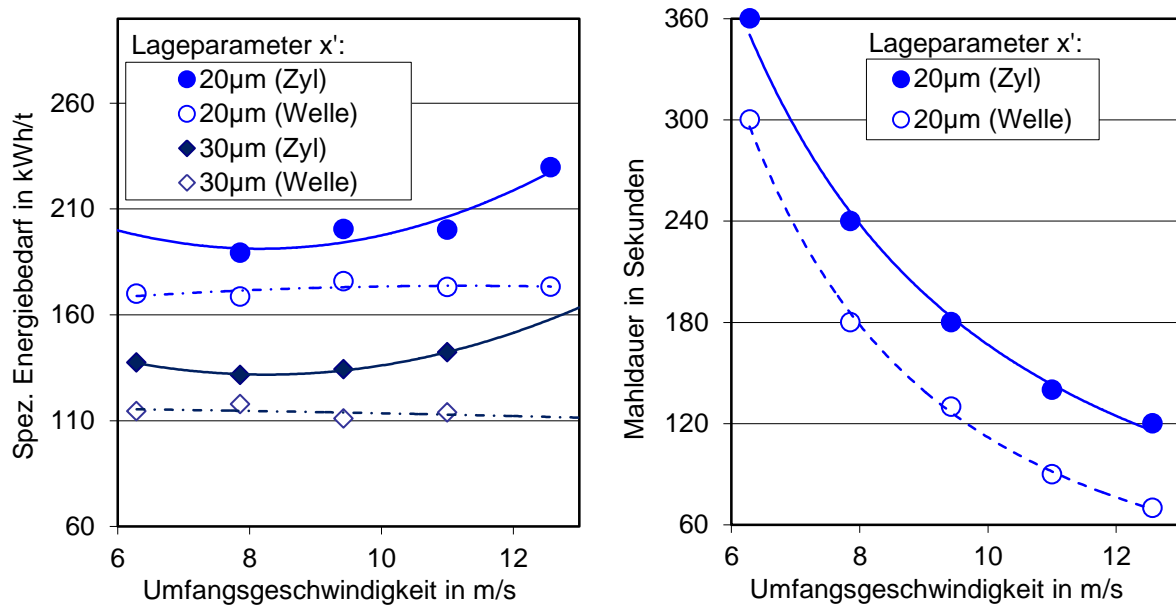


Bild 5-8 Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den spezifischen Energiebedarf (links) und die Mahldauer (rechts) für zylindrische (Zyl) und wellenförmige Geometrie (Welle) [Tre; Fle 2015]

Zur Identifikation des optimalen Mahlgutfüllstands wurden als Versuchs-Ausgangsbedingungen Stahlkugeln (2000 g, Durchmesser: 3 mm) sowie eine Drehzahl von 1500 U/min gewählt. Dies entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit von 9,4 m/s. Die Mahlgutmenge betrug initial 100 g.

Der verwendete Mahlgutfüllgrad (φ_{Mahlgut}) für diese Mühle bezieht sich auf das leere Volumen der Mahlkammer. Dementsprechend ist das durch den Rotor eingenommene Volumen von dem Mahlkammervolumen abzuziehen (**Gleichung 3**).

$$\varphi_{\text{Mahlgut}} = \frac{V_{\text{Mahlgut}}}{V_{\text{Kammer}} - V_{\text{Rotor}}} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right] \quad \text{Gleichung 3}$$

In Abhängigkeit der Mahlkammergeometrie stellt sich ein optimaler Mahlgutfüllgrad ein (**Bild 5-9**). Für die Wellengeometrie liegt dieser im Bereich zwischen 0,06 und 0,09. Bei Verwendung der zylinderförmigen Mahlkammer ist dieser etwas niedriger und liegt zwischen 0,056 und 0,07 [Tre 2013]. Befindet sich mehr Mahlgut im Mahlraum, kann dieses den Kugelflug behindern und so die zur Mahlung notwendige Energie erhöhen. Ist eine besonders schnelle Zerkleinerung gewünscht, so kann die Materialmenge reduziert werden.

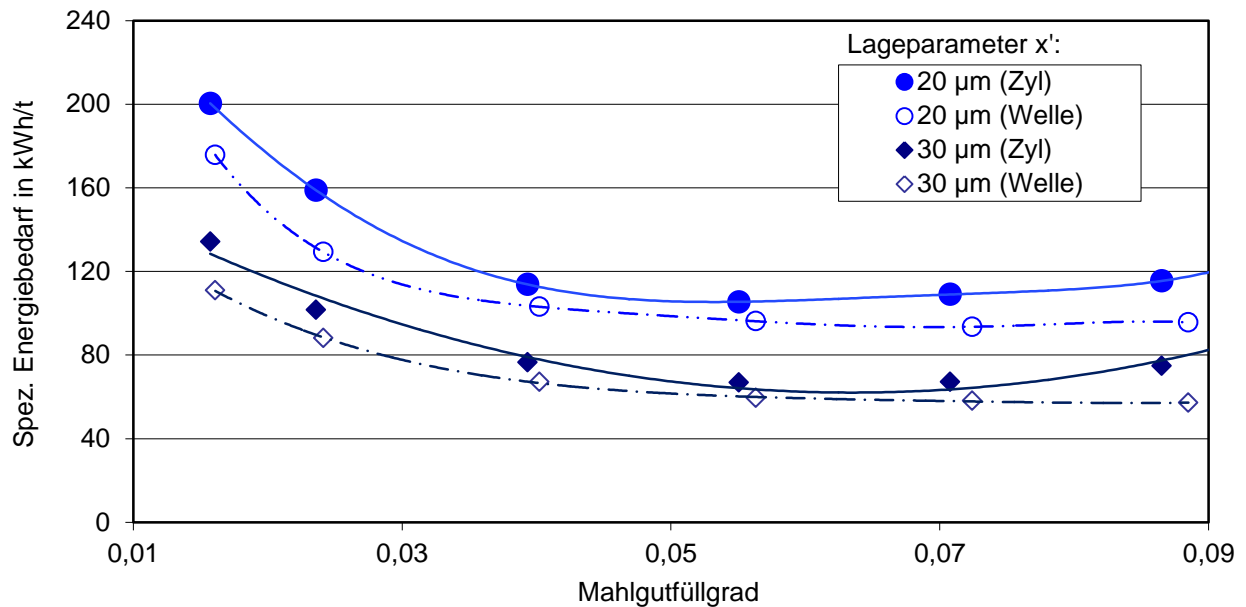


Bild 5-9 Einfluss des Mahlgutfüllgrads auf den spezifischen Energiebedarf

In einem weiteren Schritt wurde die Menge der Mahlkörper variiert (siehe **Bild 5-10**). Als Mahlgutfüllgrad wurde ein Optimum von 0,088 angenommen. Die größere Anzahl an Mahlkörpern führte zu einer höheren Anzahl an Kugel-Kugel-Interaktionen und erhöhte damit die Geschwindigkeit der Zerkleinerung. Im kontinuierlichen Betrieb kann daher davon ausgegangen werden, dass bei konstanter Produktfeinheit die Durchsatzleistung der Mühle durch einen optimalen Mahlkörperfüllgrad erhöht wird.

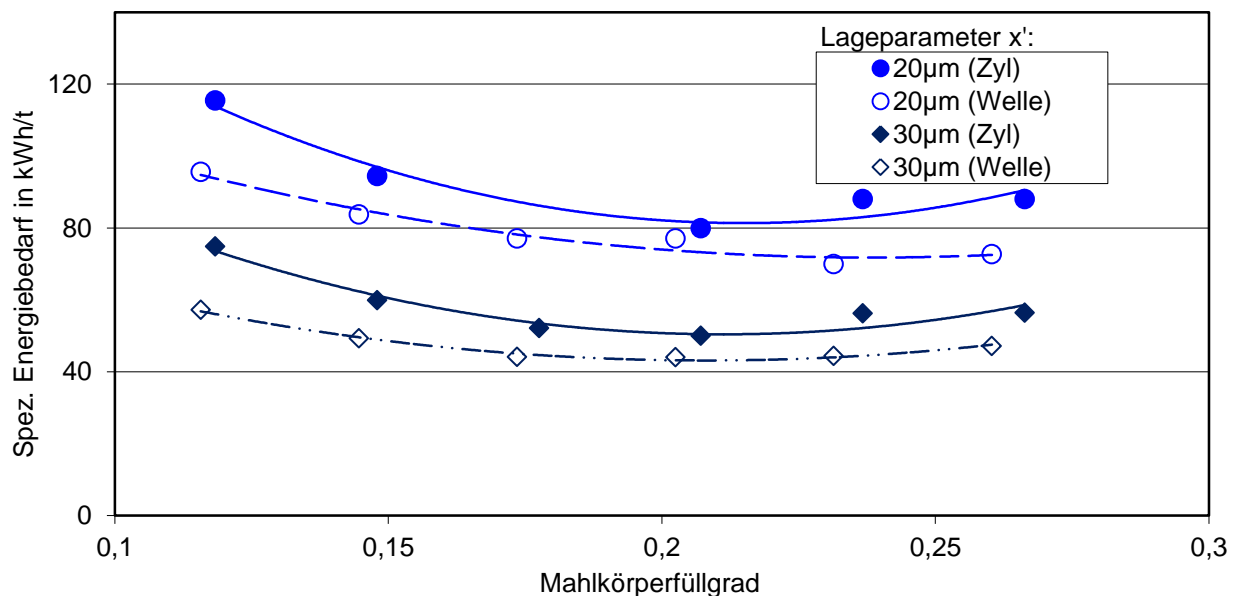


Bild 5-10 Einfluss des Mahlkörperfüllgrads auf den spezifischen Energiebedarf bei Verwendung einer zylinderförmigen und einer wellenförmigen Mahlkammer [Tre; Fle 2015]

Bei einem definierten Mahlkörperfüllgrad ($\varphi_{\text{Mahlkörper}}$) stellte sich ein Optimum ein, wodurch eine weitere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs um mindestens 20 % im Vergleich zum Ausgangspunkt dieses Optimierungsschritts möglich war. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse wurde der Mahlkörperfüllgrad als dimensionslose Kennzahl zur Bestimmung der Mahlkörpermenge eingeführt [Tre 2013]. Der Mahlkörperfüllgrad setzt sich wie folgt aus Mahlkörpervolumen und dem Mahlkammervolumen (Volumen ohne Rotor) zusammen:

$$\varphi_{\text{Mahlkörper}} = \frac{m_{\text{Mahlkörper}}}{\rho_{\text{Mahlkörper}} * (V_{\text{Kammer}} - V_{\text{Rotor}})} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right] \quad \text{Gleichung 4}$$

Vereinfachend wurde bei der Optimierung der Mahlgut- und Mahlkörpermenge jeweils das Optimum der Wellenmahlkammer der vorherigen Schritte auch für die zylindrische Mahlkammer angenommen. Um Wechselwirkungen zwischen Mahlgut- und Mahlkörpermenge auszuschließen, wurden in einem weiteren Optimierungsschritt die Parameter für beide Mahlkammergeometrien erneut variiert. Eine Verschiebung der bestimmten Optima konnte jedoch für keine der Mahlkammern festgestellt werden. Für nachfolgende Versuche wurden dementsprechend folgende Betriebsparameter als optimal identifiziert:

Tabelle 5-1 Optimale Betriebsparameter der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Parameter	Wert	Einheit
Drehzahl	1500	1/min
Mahlgutmenge	550	g
Mahlkörpermenge	4000	g
Durchmesser Mahlkörper	3	mm
Mahlkammergeometrie	Wellen	-

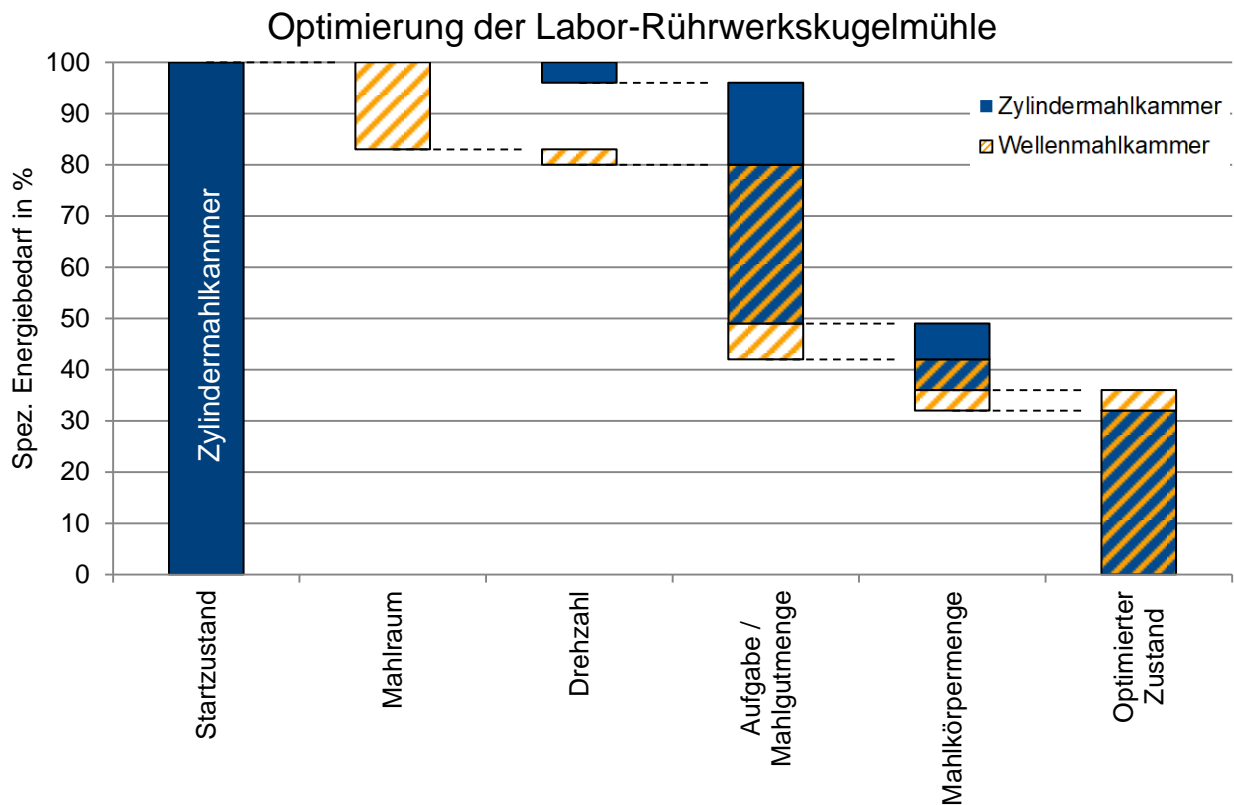


Bild 5-11 Einfluss der Betriebsparameter auf den spezifischen Energiebedarf [Tre; Fle 2015]

Bild 5-11 zeigt, dass der Startwert des spezifischen Energiebedarfs bei Nutzung der wellenförmigen Mahl­kammer bereits um 17 % niedriger war als der Startwert der zylinderförmigen Mahl­kammer. Dementsprechend wurde die Wellenmahlkammer für weitere Versuche mit dieser Anlage verwendet. Das größte Potential hinsichtlich der Zerkleinerungsleistung und des spezifischen Energiebedarfs bietet jedoch die Optimierung der Betriebsparameter. Während die Anpassung der Drehzahl nur sehr geringes Optimierungspotential aufweist, ermöglicht besonders die Anpassung der Aufgabemenge des Mahlguts eine wesentliche Verbesserung. Insgesamt war eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs auf 36 % (zylinderförmige Mahl­kammer) beziehungsweise auf 32 % (wellenförmige Mahl­kammer) des Startzustandes der zylinderförmigen Mahl­kammer, möglich. Diese Ergebnisse können auch auf andere Bauformen der Rührwerkskugelmöhlen übertragen werden.

5.3 Experimentelle Bestimmung der anlagenspezifischen Grenzen

Um das Verhalten der wesentlichen Zement-Hauptbestandteile zu untersuchen, wurden Mahlversuchen in der optimierten Rührwerkskugelmühle durchgeführt. Zur Gegenüberstellung der Klinker, des Hüttensands, des Kalksteins und der Flugasche wurden deren Mahlbarkeiten durch das Verfahren nach Zeisel bestimmt (**Bild 5-12**). Im direk-

ten Vergleich zeigt Hüttensand die schwerste Mahlbarkeit. Die Mahlbarkeit nach Zeisel von Klinker 1 und 2 ist trotz deutlich unterschiedlicher Reaktivität, gemessen an den Klinkerphasen, gleich. Der Vergleich mit den mittleren Mahlbarkeiten nach Zeisel (**Bild 3-8**) zeigt, dass Klinker 1 und 2 den mittleren Mahlbarkeitswerten für Klinker entsprechen. Die Mahlbarkeit von Klinker 3 ist etwas leichter als die der beiden anderen. Kalkstein ist unter den gegenübergestellten Materialien am leichtesten mahlbar. Die gemessene Flugasche hatte bereits eine hohe Ausgangsfeinheit von 3260 cm²/g nach Blaine. Der direkte Vergleich mit der Mahlbarkeit der anderen Hauptbestandteile ist daher schwierig, da für das Verfahren nach Zeisel die Probe in der Fraktion zwischen 0,8 und 1 mm vorliegen muss.

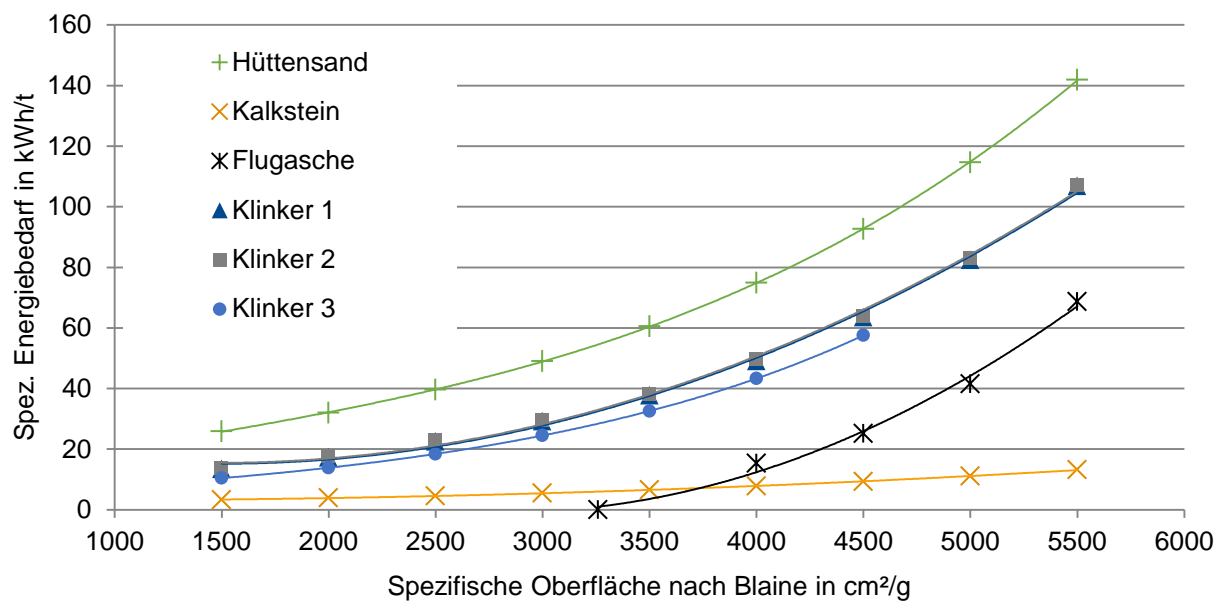


Bild 5-12 Mahlbarkeit nach Zeisel der untersuchten Zement-Hauptbestandteile

Die Zement-Hauptbestandteile wurden mit der Rührwerkskugelmühle im diskontinuierlichen Betrieb beansprucht. Die Mühle wurde mit optimalen Betriebsparametern betrieben (siehe **Tabelle 5-1**). Da sich Mahlhilfsmittel unterschiedlich auf verschiedene Mahlgüter auswirken können und für jedes Mahlgut optimiert werden müssen, wurde zunächst auf deren Nutzung verzichtet. **Bild 5-13** zeigt die Entwicklung der Feinheit dargestellt durch den Lageparameter bei definierten Beanspruchungszeiten. In der Darstellung wurde aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsfeinheiten der Mahlgüter ein Lageparameter von 20 µm als Startpunkt definiert. Dementsprechend wurde für 20 µm ein notwendiger spezifischer Energiebedarf von 0 kWh/t festgelegt. Der dargestellte Lageparameter gibt allerdings keinen Hinweis auf die Breite der Korngrößenverteilung und beschreibt daher auch nicht die Auswirkungen der Zerkleinerung auf das Maximumkorn.

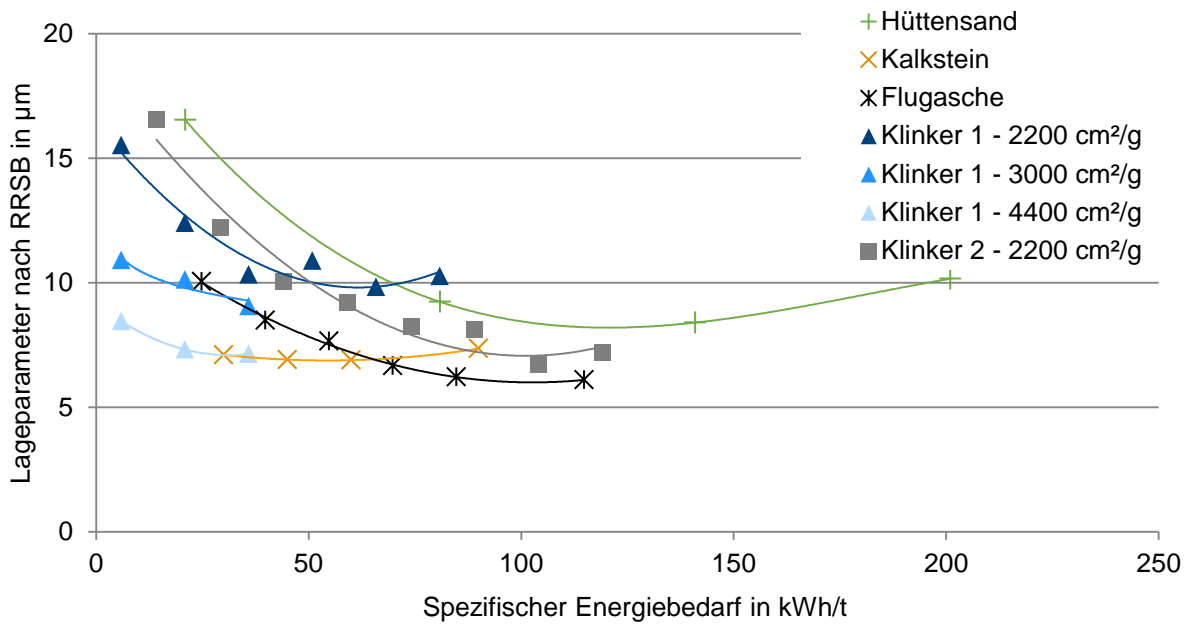


Bild 5-13 Entwicklung der Feinheit gemessen am Lageparameter bei der Mahlung in der Rührwerkskugelmühle

Am Beispiel ist zu erkennen, dass für den schwer mahlbaren Hüttensand ein hoher spezifischer Energiebedarf nötig ist, um die maximal erreichbare Feinheit zu generieren. Entgegengesetzt dazu verhält sich der Kalkstein, dessen Feinheit sich seit dem ersten Messpunkt nicht mehr veränderte. Der notwendige spezifische Energiebedarf zur Zerkleinerung ist dementsprechend gering. Die maximale Feinheit der untersuchten Klinker wird mit vergleichsweise niedrigem spezifischem Energiebedarf erreicht. Beim Vergleich beider Klinker zeigt sich jedoch ein starker Unterschied in der höchstmöglichen Feinheit. Die Flugasche konnte unter den untersuchten Materialien am feinsten gemahlen werden.

Die Aufgabefeinheit von Klinker 1 wurde zwischen 2200 cm²/g nach Blaine und 4400 cm²/g nach Blaine variiert (Korngrößenverteilung der Aufgabematerialien siehe **Tabelle A-13-5**). Es zeigte sich, dass die höchstmöglich erreichbare Feinheit (gemessen am Lageparameter) stark von der Korngrößenverteilung und der Agglomerationsneigung des Ausgangsmaterials abhängt. Die maximale Feinheit lag bei einem Lageparameter im Bereich zwischen 6,5 µm und 10 µm. Dies entspricht aufgrund der breiten Korngrößenverteilung mittelfeinen Produkten¹. Die Verifizierung der Ergebnisse wurde exemplarisch durch die BET-Methode (**Bild B 13-1**) mit Klinker 2 vorgenommen.

¹ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

Zement wird nahezu immer mit Mahlhilfen gemahlen, um die Agglomerationsneigung des Materials zu senken und die Effizienz bei der Mahlung zu verbessern. Daher wurden zusätzliche Mahlversuche mit Mahlhilfsmitteln durchgeführt. Als Ausgangsmaterial wurde Klinker 1 auf $2600 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine aufgemahlen. Als Mahlhilfen wurden Diethylenglycol ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$) und Triisopropanolamin ($\text{C}_9\text{H}_{21}\text{NO}_3$) verwendet. Obwohl die Dosierung der Mahlhilfen zwar in ihren Größenordnungen bekannt ist, besteht hier oft ein deutliches Optimierungspotential.

Die Verwendung von Diethylenglycol (DEG) reduziert den spezifischen Energiebedarf bei der Mahlung deutlich (**Bild 5-14**). Besonders bei DEG mit einer Dosierung von 0,0125 M.-% ist eine deutliche Effizienzsteigerung gegenüber der Mahlung ohne Mahlhilfsmittel zu beobachten. Im direkten Vergleich zwischen der Mahlung mit 0,0125 M.-% und ohne Mahlhilfe ist bei einem Lageparameter von etwa $10 \mu\text{m}$ eine Reduktion um etwa 50 % des spezifischen Energiebedarfs zu beobachten.

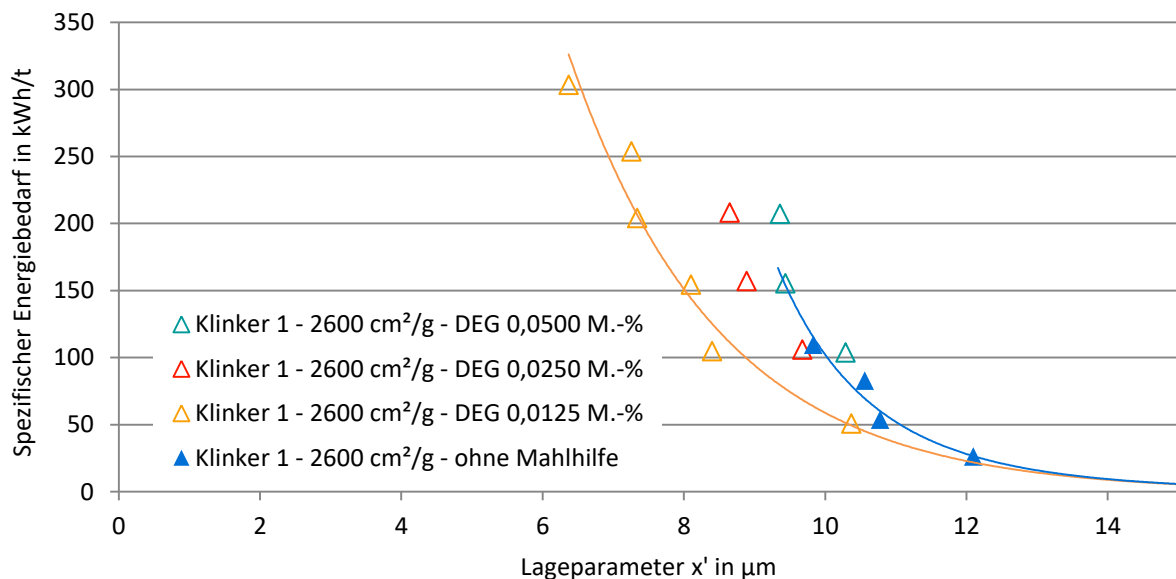


Bild 5-14 Einfluss von Diethylenglycol (DEG) als Mahlhilfsmittel auf die Zerkleinerung von Klinker

Es zeigt sich auch, dass besonders breite Korngrößenverteilungen (von bis zu $n=0,72$, **Tabelle A-13-2**) bei Lageparametern von etwa $6,4 \mu\text{m}$ erreichbar sind. Die direkte Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen bestätigt dies (**Bild 5-15**). Bei niedrigeren Dosierungen von Diethylenglycol (DEG) wurde ein deutlich höherer Feinstanteil ermahlen.

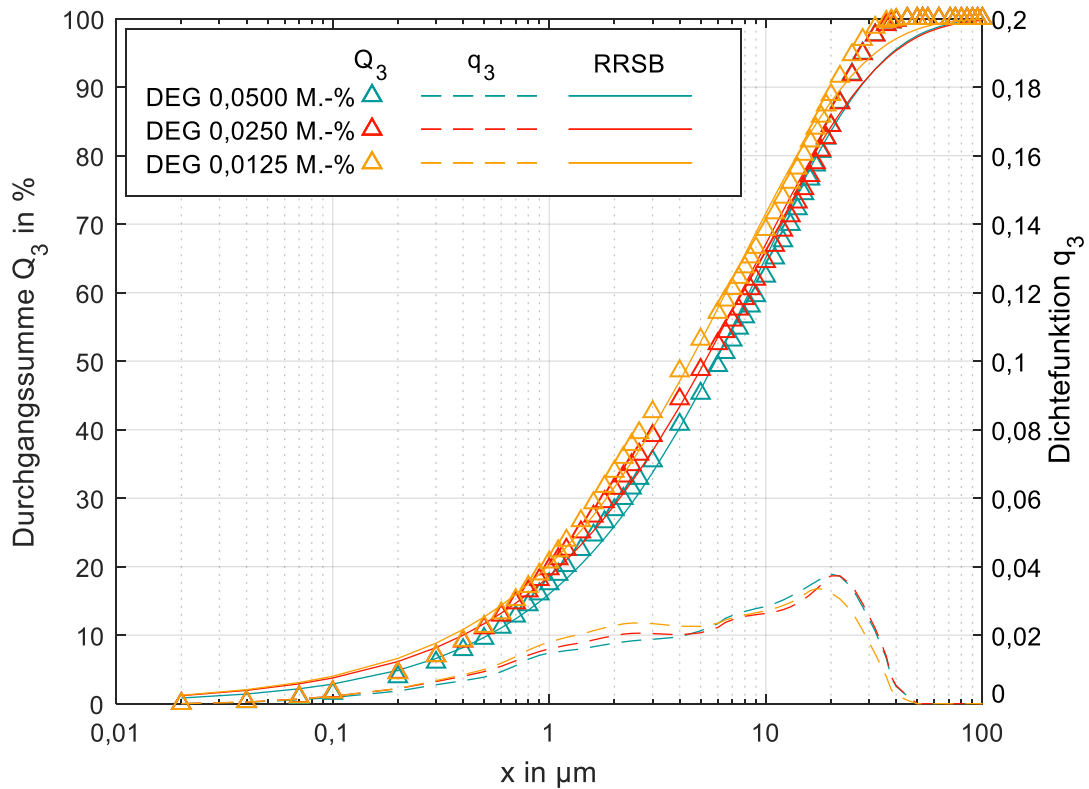


Bild 5-15 Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen bei 120 s Beanspruchungsdauer mit unterschiedlichen Dosierungen von Diethylenglycol (DEG)

Bei Verwendung von Triisopropanolamin (TIPA) (**Bild 5-16, Tabelle A-13-3**) zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden untersuchten Dosierungen (0,050 M.-% und 0,025 M.-%). Die Verwendung von TIPA wirkt sich positiv auf den spezifischen Energiebedarf aus. Die untersuchten Mahlhilfsmittel wirken sich bei angepasster Dosierung gleich auf die Mahlung aus.

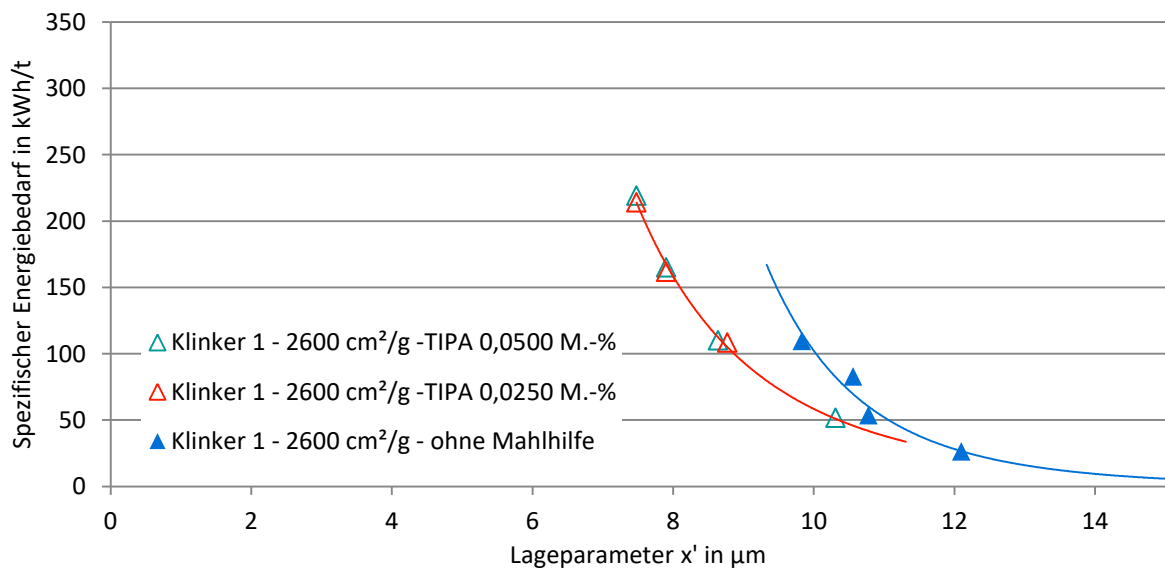


Bild 5-16 Einfluss von Triisopropanolamin (TIPA) als Mahlhilfsmittel auf die Zerkleinerung von Klinker

6 Mahlversuche zur separaten Feinstmahlung

6.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Nach DIN EN 196-2 wurde von den verwendeten Klinkern die chemischen Zusammensetzungen durch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) (**Tabelle 6-1**) und die mineralogische Zusammensetzung durch röntgenographische Phasenanalyse (Rietveldauswertung, **Tabelle 6-2**) bestimmt.

Durch die RFA wurde für Klinker 1 und Klinker 3 ein Kalkstandard (KST) von 94,5 % und ein sehr hoher Silikatmodul (SM) festgestellt, dementsprechend sind hohe Anteile der Klinkerphase Alit und moderate Anteile der Klinkerphase Belit enthalten. Der Kalkstandard von Klinker 2 (95 %) ist etwa identisch dem der anderen Klinker, wobei der Silikatmodul niedriger ist. Dementsprechend ist der Anteil der Klinkerphase Alit in Klinker 2 niedriger.

Die Ergebnisse aus den chemischen Untersuchungen finden sich im Wesentlichen in der röntgenographischen Phasenanalyse wieder. Klinker 1 und Klinker 3 haben einen niedrigen Freikalkgehalt. Folglich weisen diese trotz den hohen Silikatmodulen einen sehr guten Brenngrad auf. Klinker 2 hat im Gegensatz zu den beiden anderen Klinkern einen sehr hohen Freikalkgehalt (3,6 %). Die röntgenographische Phasenanalyse von Klinker 3 zeigt einen niedrigeren Anteil der Klinkerphase Alit (65,6 %) als Klinker 1 (73 %), aber einen höheren Gehalt der Klinkerphase Belit. Im Vergleich zeigt sich, dass der Gehalt der Klinkerphase Belit von Klinker 2 deutlich über den beiden anderen Klinkern liegt.

Auf Basis der oben genannten Untersuchungen wurde für den direkten Vergleich zwischen den ersten beiden Klinkern in den Untersuchungen der Zementeigenschaften Klinker 1 als reaktionsfähiger und Klinker 2 als weniger reaktionsfähig eingestuft. Die Reaktionsfähigkeit von Klinker 3 ist zwischen den beiden ersten Klinkern einzuordnen.

Um die Zementeigenschaften untersuchen zu können, wurden den gemahlenen und gemischten Klinkermehlen Sulfatträger zugegeben. Auf Basis der chemisch-mineralogischen Untersuchungen wurden die Zusammensetzungen der Sulfatträger für Klinker 1 und Klinker 2 optimiert. Für die Klinkermehle aus Klinker 3 wurden die Sulfatträger wie im Zementwerk verwendet. Die Anteile der Sulfatträger der hergestellten Zemente finden sich im Anhang (**Tabelle A-13-1**).

Tabelle 6-1 Chemische Zusammensetzung der Klinker (Röntgenfluoreszenzanalyse) mit nach Bogue berechneten Modulen und Phasenzusammensetzungen

		Klinker 1	Klinker 2	Klinker 3
Kohlendioxid	%	0,11	0,14	0,12
Wasser	%	0,38	0,17	0,11
Glühverlust	%	0,49	0,31	0,23
Silizium(IV)oxid	%	24,01	21,35	23,79
Aluminiumoxid	%	3,70	5,24	3,97
Titandioxid	%	0,20	0,24	0,20
Phosphor(V)oxid	%	0,16	0,25	0,15
Eisen(III)-oxid	%	1,37	3,41	1,47
Mangan(III)-oxid	%	0,05	0,09	0,04
Magnesiumoxid	%	0,83	3,41	0,68
Calciumoxid	%	67,88	63,28	67,75
Sulfat als SO ₃	%	0,41	1,01	0,66
Kaliumoxid	%	0,47	1,30	0,77
Natriumoxid	%	0,15	0,15	0,22
Na ₂ O-Äquivalent	%	0,46	1,00	0,73
Alit (C ₃ S)	%	67,53	55,39	66,40
Belit (C ₂ S)	%	18,47	19,63	18,35
C ₃ A	%	7,55	8,15	8,06
C ₄ (A,F)	%	4,21	10,40	4,48
KST	%	94,5	95,0	94,5
SM	%	4,7	2,5	4,38
TM	%	2,7	1,5	2,71
SG	%	69,1	77,8	70,3

Tabelle 6-2 Röntgenographische Phasenanalyse der Klinker (Rietveld-Auswertung)

Phase		Klinker 1	Klinker 2	Klinker 3
Alit (C ₃ S)	%	73,0	47,5	65,6
Belit (C ₂ S)	%	15,5	27,4	21,5
C ₂ (A,F)	%	2,5	10,5	2,5
C ₃ A _{cub.}	%	6,4	3,5	6,8
C ₃ A _{orth.}	%	1,4	3,0	1,8
Freikalk	%	< 0,5	3,6	Spuren
Periklas	%	< 0,5	2,9	-
Arcanit	%	< 0,5	1,2	0,8
Aphthitalit	%	-	< 0,5	0,8
Quarz	%	-	Spuren	-

6.2 Kleintechnische Mahlversuche

Mit Hilfe kleintechnischer Mahlanlagen wurde zunächst der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Zementeigenschaften untersucht. Hierzu wurden Klinker 1 und Klinker 2 genutzt. Zur Herstellung der Zwischenprodukte wurde im 1. Mahlschritt eine kleintechnische Vertikal-Wälzmühle verwendet; zur anschließenden Feinstmahlung wurde die bereits in Kapitel 5.2 beschriebene diskontinuierlich betriebene Rührwerkskugelmühle genutzt. Zur späteren Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Mörteluntersuchungen wurden Referenzprodukte in einer halbtechnischen Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle gemahlen.

Die Umlaufmahlanlage (siehe **Bild 6-1**) besteht aus einer Ein-Kammer-Kugelmühle mit einer Länge von 1,2 Metern. Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser beträgt 3. Über eine Mantelheizung werden konstante Temperaturen im Mahlraum bereits von Beginn des Versuches an sichergestellt. Das Mühlenaustragsgut der Kugelmühle wird über eine Schnecke zu einem Becherwerk gefördert, von dem es auf den Stabkorbsichter gegeben wird. Dieser trennt das Grobgut ab und fördert es über eine Bandwaage zurück in die Kugelmühle. Die Frischgutmenge wird entsprechend der Rückgutmenge angepasst, um die Aufgabe auf die Mühle möglichst konstant zu halten. Die Entstaubung von Mühle und Sichter wird durch je einen Zyklon erreicht. Die maximale Frischgut-Aufgabemenge beträgt 40 kg/h. Die maximale Aufgabekorngröße beträgt bei dieser Anlage 2 mm. Die Versuche wurden mit einer Aufgabe von etwa 10 kg/h gefahren, um die nötige Feinheit zu erreichen.

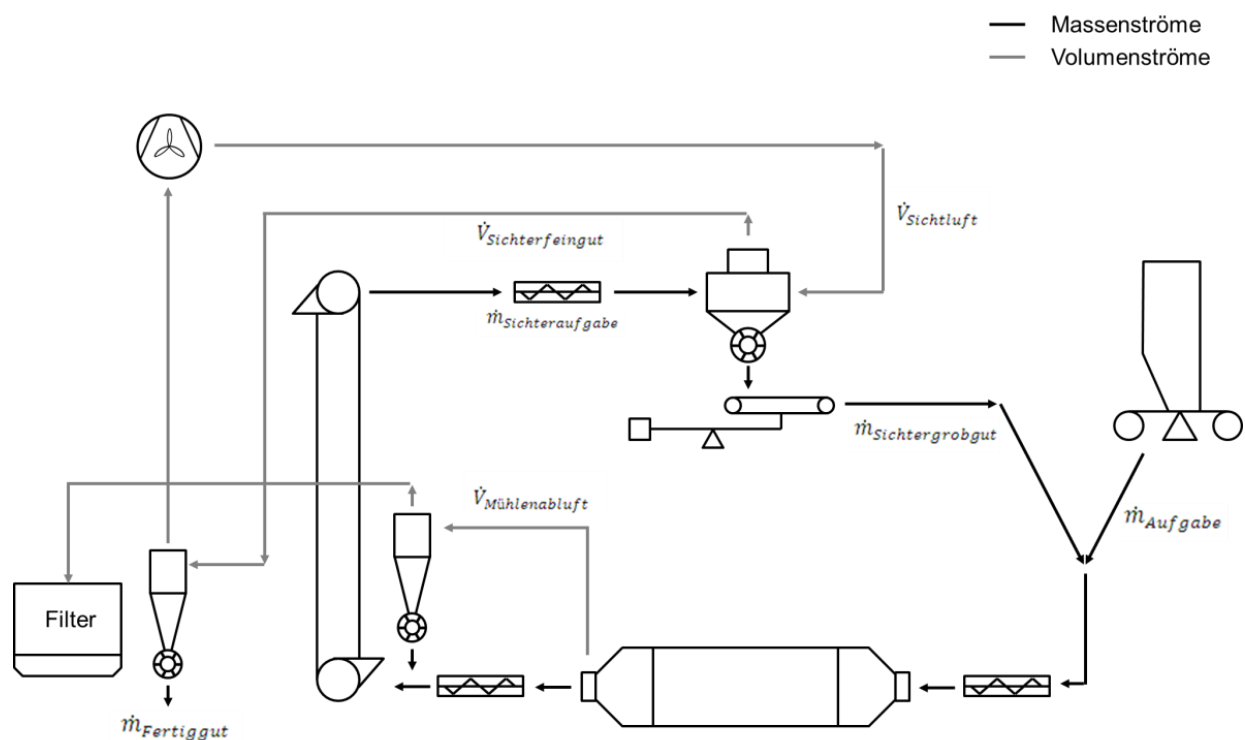


Bild 6-1 Fließbild der halbtechnischen Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle

Klinker 1 wurde auf eine spezifische Oberfläche von etwa 5000 cm²/g nach Blaine gemahlen. Dies entspricht etwa dem mittleren Wert für CEM I-Zemente der Festigkeitsklasse 52,5. Klinker 2 wurde auf 5270 cm²/g nach Blaine gemahlen, um dessen niedrigere Reaktivität auszugleichen. Die Mahlanlage wurde über mehrere Stunden eingefahren, um einen stabilen Zustand während der Probenahme zu gewährleisten. Die Untersuchung des Sichters während der Mahlung zeigt einen Bypass von 7,3 %, was für diesen Sichtertyp in einem guten Bereich liegt.

Tabelle 6-3 Granulometrische Charakterisierung von CEM I-Zementen sowie der Vergleich zu Mahlversuchen auf der Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle

Zementart	Festigkeitsklasse	Lageparameter x' in µm	Steigungsmaß n	Spez. Oberfläche nach Blaine in cm ² /g		
				Min	Mittel	Max
CEM I	32,5	24,3 ¹⁾	0,86 ¹⁾	2520 ²⁾	3122 ²⁾	3840 ²⁾
	42,5	18,1 ¹⁾	0,85 ¹⁾	2900 ²⁾	3635 ²⁾	4350 ²⁾
	52,5	11,4 ¹⁾	0,86 ¹⁾	3220 ²⁾	4858 ²⁾	5410 ²⁾
Klinkermehle aus den Referenzmahlungen mit der Umlaufmahlanlage						
Klinker 1		10,92	0,91	4950		
Klinker 2		10,21	0,87	5270		

¹⁾ Auswertung der Datenbank des Lasergranulometer der VDZ gGmbH, 2017

²⁾ [VDZ 2018]

Beide Referenzmahlungen in der Umlaufmahlanlage weisen etwas steilere Korngrößenverteilungen auf, als im Mittel für in Deutschland gemahlene Zemente bestimmt wurde (siehe auch **Tabelle 6-3**). Die Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen des berechneten mittleren CEM I-Zements (*Referenz-Zemente werden nachfolgend in Graustufen dargestellt*) und den beiden Produkte aus der Umlaufmahlanlage (**Bild 6-2**) zeigt, dass sich im Wesentlichen der Grobbereich unterscheidet.

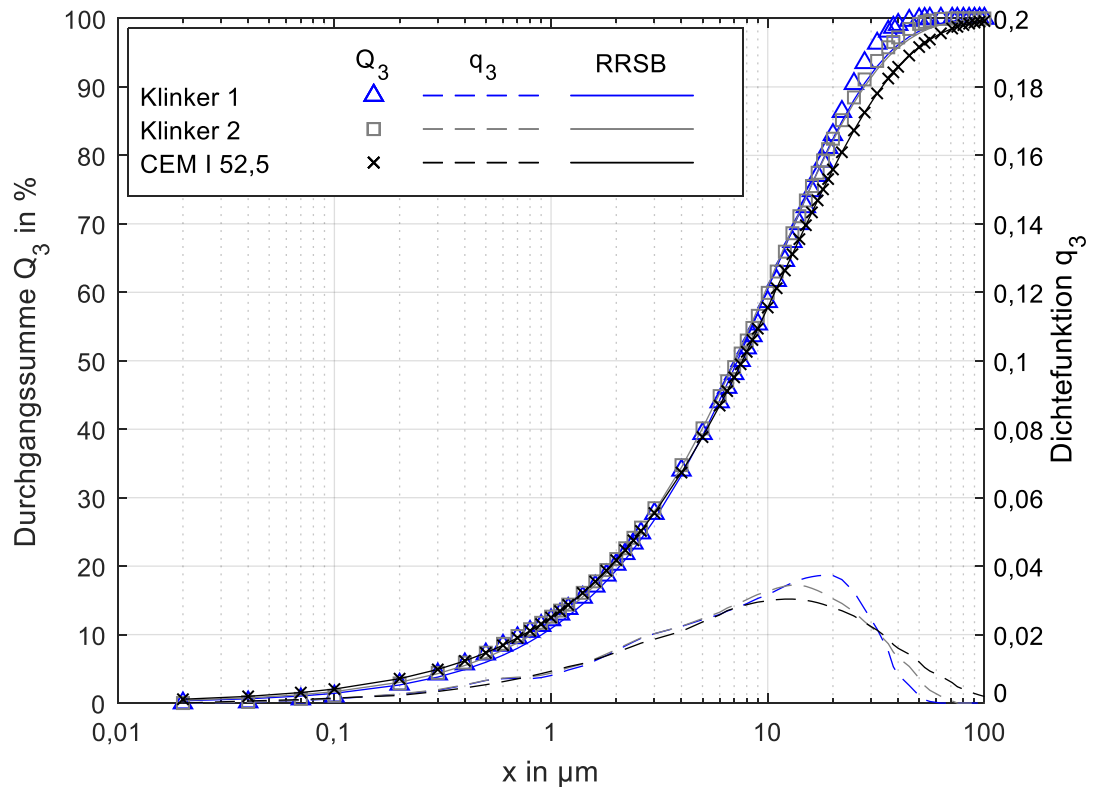


Bild 6-2 Mittlere Korngrößenverteilung von CEM I 52,5 im Vergleich zu den Mehlen aus der Kugelmühlen-Umlaufmahanlage

Die separate Feinstmahlung soll auf Zwischenprodukte aus effizienten Mahlverfahren (z.B. der Hochdruckzerkleinerung) zurückgreifen, um deren vergleichsweise hohe Energieeffizienz nutzen zu können. Im 1. Mahlschritt wurden die für die Hochdruckzerkleinerung typischen Korngrößenverteilungen in einer kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle der Fa. Gebr. Pfeiffer (MPS 16) (**Bild 6-3**) hergestellt.

Die Vertikal-Wälzmühle besteht aus einem angetriebenen Mahlteller, auf dem 3 Mahlwalzen abrollen. Die Mahlwalzen werden durch Federpakete auf den Mahlteller gedrückt. Durch die Zentrifugalwirkung des sich drehenden Mahltellers wird das Material von der Mitte des Tellers nach außen transportiert. Zwischen den Mahlwerkzeugen bildet sich ein Materialbett aus und wird zerkleinert. Anschließend wird das zerkleinerte Mahlgut durch pneumatischen Transport zum Sieb gefördert. Das Grobgut wird mit dem Frischgut in der Mitte des Mahltellers vereinigt. Das Fertiggut wird durch einen Zyklon aus dem Luftstrom abgeschieden. Mit der Mahlanlage ist eine Produktion von Feinheiten im Bereich von etwa 2000-4500 cm²/g nach Blaine möglich. Der Frischgut-Massenstrom betrug etwa 10-40 kg/h.



Bild 6-3 Kleintechnische Vertikal-Wälzmühle. Links: Gesamtanlage; Rechts: Mahlraum

Für Klinker 1 und Klinker 2 wurden je 4 Zwischenprodukte in der Vertikal-Wälzmühle gemahlen (**Tabelle A-13-4**). Zielfeinheiten waren 2200, 2600 und 3000 cm²/g nach Blaine (grob¹) sowie die maximal erreichbare Feinheit, welche sich für beide Materialien in dieser Vertikal-Wälzmühle bei etwa 4400 cm²/g nach Blaine (mittelfein¹) eingestellt hat. Sehr enge Korngrößenverteilungen sind für die industrielle Hochdruckzerkleinerung, verglichen mit Produkten aus der Kugelmühle, äußerst charakteristisch. Diese konnten in der Vertikal-Wälzmühle erzeugt werden (**Bild 6-4** und **Bild B 13-3**). Der Vergleich zum mittleren CEM I 32,5 (ca. 3100 cm²/g nach Blaine) zeigt, dass die Produkte aus der Vertikal-Wälzmühle bei vergleichbaren Feinheiten deutlich weniger Fein- und Grobmaterial enthalten.

¹ Definition der Feinheitbereiche siehe Anhang Kapitel F.

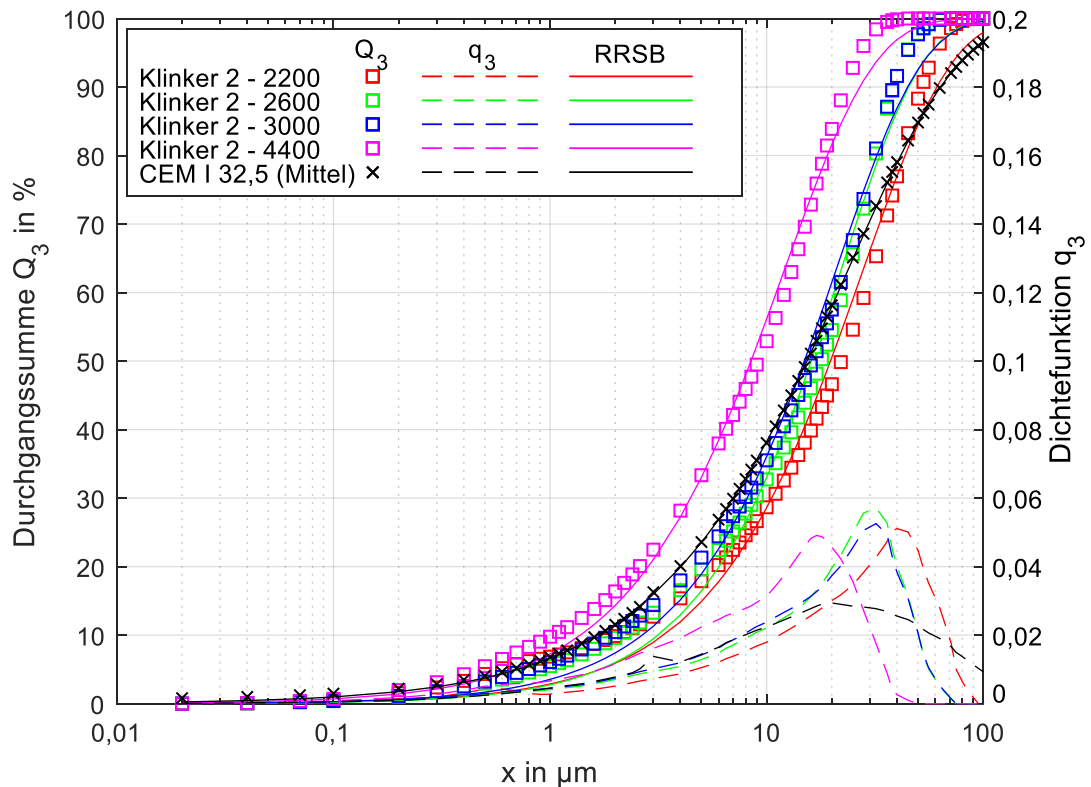


Bild 6-4 Darstellung der Korngrößenverteilungen ausgewählter Mehle von Klinker 2 aus der Vertikal-Wälzmühle im Vergleich zur mittleren Korngrößenverteilung von CEM I 32,5

Die Zwischenprodukte aus der Vertikal-Wälzmühle dienen als Komponenten für die Mischungen, aber auch als Aufgabematerial für die im 2. Mahlschritt nachgeschaltete Mühle. Die für die Mahlung in der Rührwerkskugelmühle verwendeten Betriebsparameter sind in **Tabelle 5-1** beschrieben. Basierend auf den Vorversuchen (Kapitel 5.3) und Modellrechnungen (siehe auch Kapitel 8.1) wurden die entsprechenden Feinstmaterialien erzeugt. Hierzu wurden die Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt in äquidistanten Zeitschritten (15 Sekunden) in der Rührwerkskugelmühle beansprucht.

6.3 Mahlversuche in Industrieumgebung

Um eine verlässliche Aussage über den spezifischen Energiebedarf treffen zu können, wurden Mahlversuche mit Klinker 3 an einer Hochdruckzerkleinerungsanlage in Industrieumgebung (Glasmahlung) und einer kontinuierlich betriebenen Rührwerkskugelmühle im Technikum durchgeführt. Exemplarisch wurde aus den Zwischenprodukten aus beiden Mahlschritten ein CEM I 42,5 N, CEM I 52,5 N und ein CEM I 52,5 R (siehe auch **Bild 6-5** und **Tabelle A-13-14**) nachgebildet. Diese wurden in einer Kugelmühle des Zementwerkes hergestellt, aus dem Klinker 3 bezogen wurde.

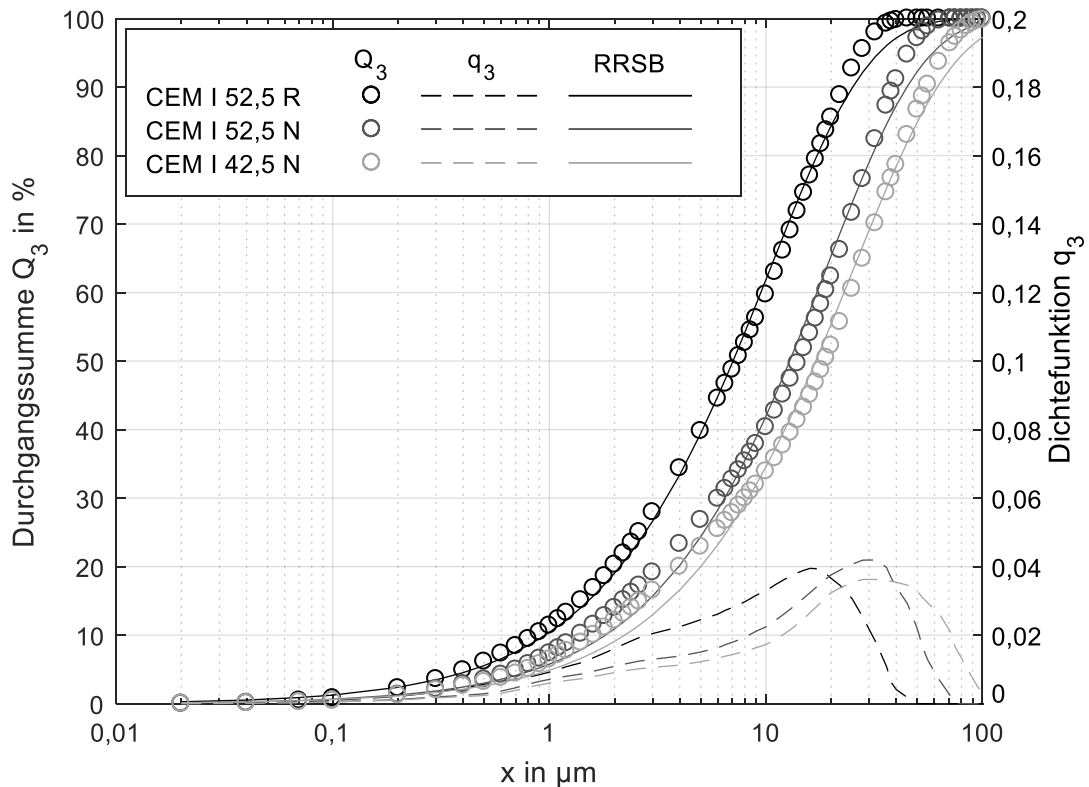


Bild 6-5 Korngrößenverteilungen der industriell hergestellten CEM I-Zemente

Im Vorfeld der Mahlversuche wurden geeignete Korngrößenverteilungen identifiziert. Zielgrößen waren hier:

- Maximalkorn des größten Zwischenprodukts aus dem 1. Mahlschritt soll etwa identisch dem der Referenz sein,
- Möglichst steile Korngrößenverteilung und
- Mindestens zwei deutlich unterschiedlich feine Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt.

Für die Mahlversuche im skalierbaren Maßstab wurde Klinker 3 verwendet, da dieser sehr geringe Schwankungen der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung aufweist, wobei die Mahlbarkeit (siehe auch **Bild 5-12**) etwas leichter als der Durchschnitt ist. Der Klinker weist darüber hinaus nur einen geringen Feinanteil auf (**Bild B 13-2**).

6.3.1 Vormahlung in der Argo-Mühle

Zur Vorzerkleinerung im 1. Mahlschritt wurde exemplarisch für Hochdruckzerkleinerungsanlagen eine Argo-Mühle (**Bild 6-7**) verwendet. Im betrieblichen Alltag wird die genutzte Anlage zur Mahlung von Glas verwendet. Die beiden Mahlwalzen dieser

Mühle sind diagonal angeordnet. Die obere Walze (Durchmesser etwa 600 mm) wird angetrieben (hier 1,5 m/s, möglicher Betriebsbereich: 0,5 - 4 m/s) und treibt die untere Mahlwalze durch Reibschluss an (siehe auch **Bild 6-6**). Die untere Mahlwalze (Durchmesser etwa 1000 mm) wird mittels Hydraulik gegen die obere Walze gedrückt. Bei Gutbett-Walzenmühlen stehen Durchsatzmenge, Spaltweite und spezifische Mahlkraft in direkter Abhängigkeit. Bei der Argo-Mühle gibt es diese Limitierung nicht. Die spezifische Mahlkraft kann über einen Bereich von 2-5 N/mm² eingestellt werden, ohne die Durchsatzmenge direkt zu beeinflussen.

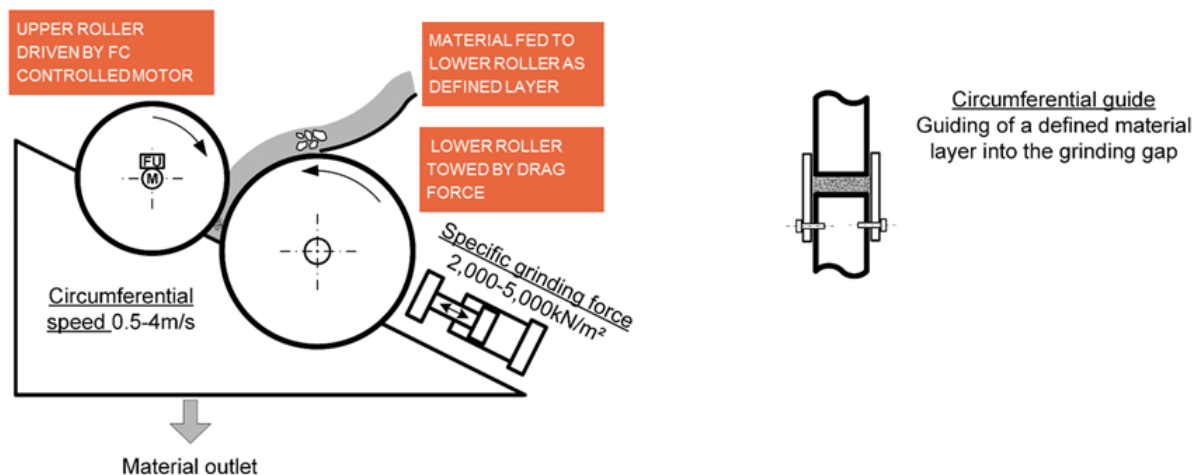


Bild 6-6 Funktionsprinzip der Argo-Mühle [Drü 2018]

Die spezifische Mahlkraft wurde (auf Empfehlung des Herstellers) für die Versuche auf 3,5 N/mm² eingestellt. Die geringe Walzenbreite (100 mm) hat deutliche Randzoneneinflüsse zur Folge, die laut Hersteller einen Bypass am Walzenspalt (also nicht beanspruchtes Material) von 40-50 % verursachen können. Bei Verwendung breiterer Walzen bleibt der Einfluss absolut gesehen gleich, spezifisch wirkt er sich allerdings deutlich geringer aus.

Der Nullspalt zwischen den beiden Walzen wurde auf 12-15 mm eingestellt. Die untere Walze verfügt über einen mitlaufenden Staurand, der das Material in die Beanspruchungszone zwingt (**Bild 6-6**). Die Mühle wurde über ein Förderband beschickt, auf welches der Vorbunker das Material aufgibt. Die genutzte Mühle kann ein Maximal Korn von 30 mm zerkleinern. Da Klinker 3 Partikel enthält, die größer 30 mm sind (**Tabelle A-13-25**), wurde das Aufgabematerial vor der Beschickung des Bunkers abgesiebt, vorgebrochen und der Aufgabe wieder hinzugefügt. Der Anteil an Partikeln größer 30 mm betrug etwa 2,3 %, der nötige Energiebedarf zum Brechen wurde aufgrund des geringen Anteils vernachlässigt.

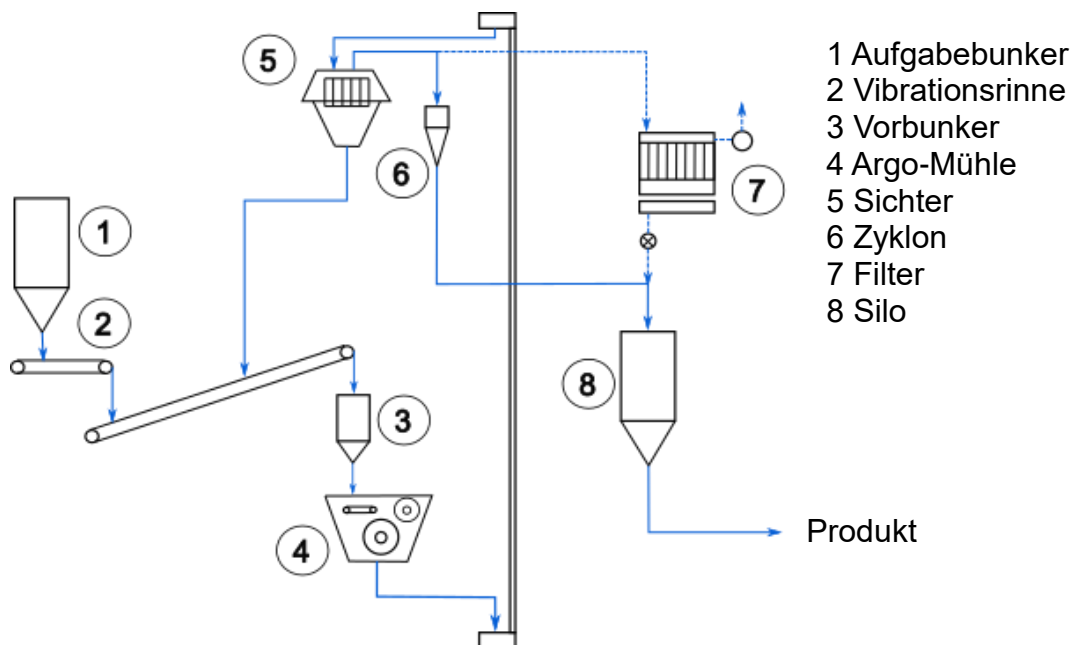


Bild 6-7 Oben: Verwendete Argo-Mühle. Unten: Schaltbild des Argo-Mühlen Siebterkreislaufs [ECR 2019]

Die Mahlanlage wurde im Kreislauf mit einem Hochleistungssichter betrieben, dessen Drehzahl zur Änderung der Feinheit variiert wurde. Nach einem Stabilisierungszeitraum von mindestens 20 Minuten wurden die ersten Proben genommen. Die Gleichmäßigkeit des Betriebs der Anlage zeigte sich durch geringe Schwankungen der Korngrößenverteilungen und der Betriebsparameter.

Im 1. Mahlschritt wurden Zwischenprodukte mit möglichst identischem Maximalkorn im Vergleich zu den Referenz-Zementen ermahlen (**Bild 6-8**):

- Das Maximalkorn des supergrogen¹ Zwischenprodukts entspricht etwa dem des Referenzzements CEM I 42,5 N
- Das Maximalkorn des groben¹ Zwischenprodukts entspricht etwa dem des Referenzzements CEM I 52,5 N
- Die Argo-Mühle war in der erreichbaren Feinheit limitiert, da der Siebhalter bereits mit maximaler Drehzahl betrieben wurde. Daher konnte das Maximalkorn des CEM I 52,5 R nicht erreicht werden. Dementsprechend sind bei der Nachbildung dieses Zements hohe Feinstanteile aus dem 2. Mahlschritt nötig.

Generell kann durch Hochdruckzerkleinerung jedoch auch wesentlich feineres Material erzeugt werden [Avc 2018].

Bild 6-8 zeigt die engen Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte aus der Argo-Mühle. Durch die RRSB-Funktion wird jedoch ein geringerer Feinanteil beschrieben als gemessen wurden (Feinstbereich unterrepräsentiert gegenüber der RRSB-Funktion), der Grobbereich hingegen wird durch die RRSB-Funktion stärker ausgeprägt. Im Vergleich zu den Kugelmühlzementen fehlt ein signifikanter Materialanteil im Feinstbereich. Dieser muss separat im 2. Mahlschritt erzeugt werden.

¹ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

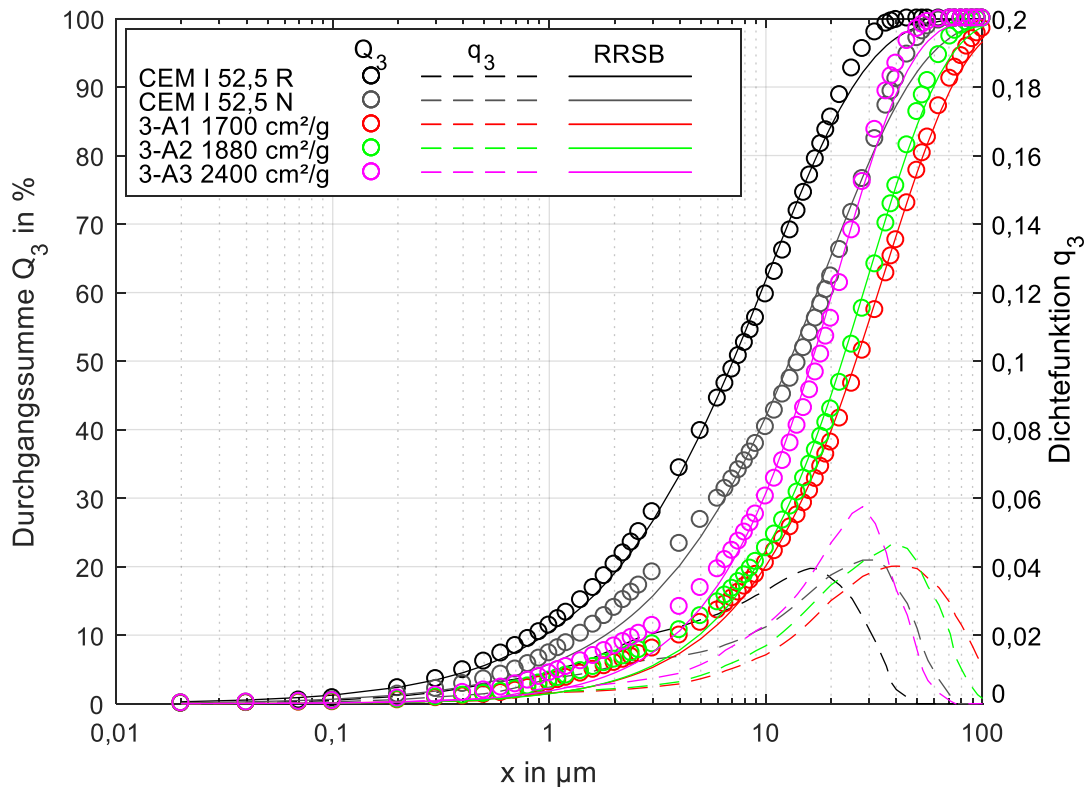


Bild 6-8 Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (Argo-Mühle) zur Nachbildung der Zemente industrieller Herkunft

Bild 6-9 und **Tabelle 6-4** zeigen, dass die Argo-Mühle einen deutlich geringeren spezifischen Energiebedarf aufweist als industriell genutzte Kugelmøhlen. Zum Vergleich ist der mittlere spezifische Energiebedarf für CEM I-Zemente, gemahlen in Kugelmøhlen, dargestellt (Datenherkunft siehe Kapitel 6.2 und Kapitel D). Im Gegensatz zu den in **Bild 6-9** dargestellten CEM I-Zementen, wurde bei den Mahlversuchen der Sulfatträger erst der Mischung hinzugefügt und nicht gemeinsam mit dem Klinker gemahlen. Da Sulfatträger leichter mahlbar sind als Klinker, ist bei gemeinsamer Mahlung von Klinker und Sulfatträger von einem geringeren spezifischen Energiebedarf auszugehen als bei der Mahlung von Klinker. Leicht mahlbare Bestandteile reichern sich in der Regel im Feinstbereich an und erhöhen die Produktfeinheit bei gleichem Energieeintrag. Aufgrund der engen Verteilung der Korngrößenverteilung der Argo-Mühle sind die spezifischen Oberflächen nach Blaine bei gleichem Lageparameter deutlich geringer als im Vergleich zu Kugelmøhlen.

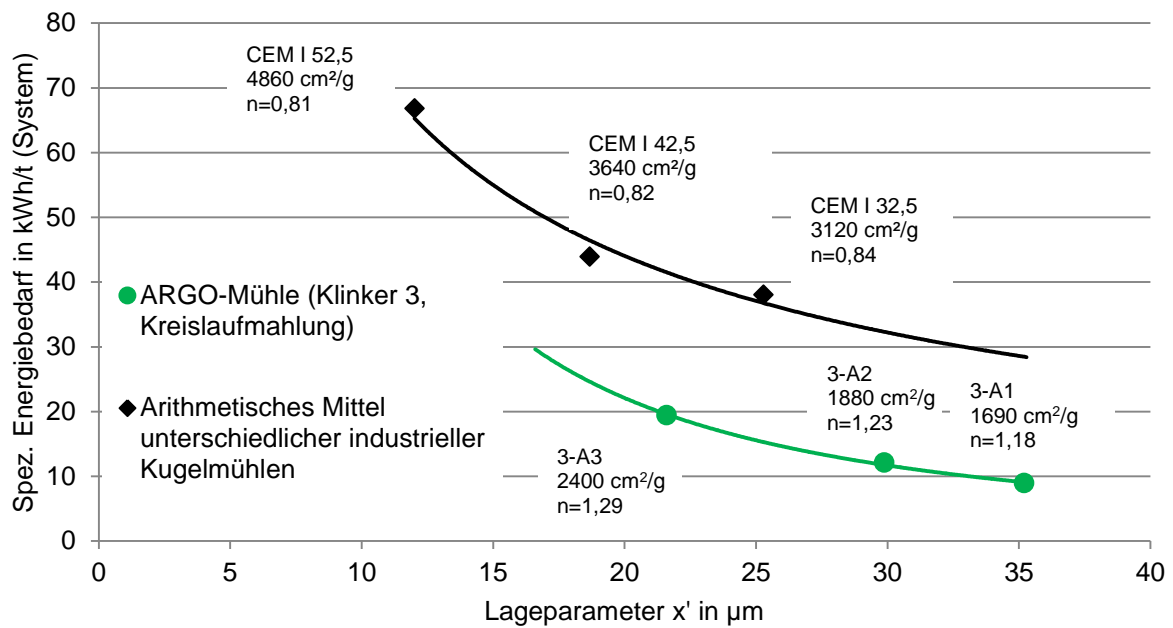


Bild 6-9 Spezifischer Energiebedarf der Argo-Mühle im Vergleich zu CEM I-Zemente aus industriellen Kugelmühlen

Tabelle 6-4 Mahlversuche in der Argo-Mühle im Sichter-Kreislauf mit Klinker 3

Argo-Mühle		Klinker 3		
		3-A1	3-A2	3-A3
Anlagendurchsatz	t/h	2,9	2,1	1,3
Sichter	1/min	315	415	625
Lageparameter nach RRSB	μm	35,2	30,0	21,4
Steigungsmaß nach RRSB	-	1,18	1,23	1,29
Spez. Oberfläche nach Blaine	cm^2/g	1700	1880	2400
Spez. Energiebedarf (Mühle)	kWh/t	6,9	9,3	14,9
Spez. Energiebedarf (System)*	kWh/t	8,9	12,1	19,4

* Annahme 30 % zusätzlicher Energiebedarf für den Sichter und die Transporteinrichtungen

6.3.2 Feinstmahlung in einer trockenen Rührwerkskugelmühle

Für die separate Feinstmahlung wurde eine kontinuierlich betriebene horizontale Rührwerkskugelmühle verwendet. Bei der Netzsch Pamir® (**Bild 6-10**) handelt es sich um eine Luftstrommühle, welche das Mahlgut durch einen Transport-Volumenstrom (hier $300 \text{ m}^3/\text{h}$, Empfehlung Fa. Netzsch) durch die Mahlkammer fördert. In der Mahlkammer (30 l Volumen) befindet sich ein Rührwerk, das die Kugelcharge (Durchmesser von 6 mm) mit 400 U/min antreibt. Der Mahlkörperfüllgrad betrug während der Untersuchungen etwa 60 %.

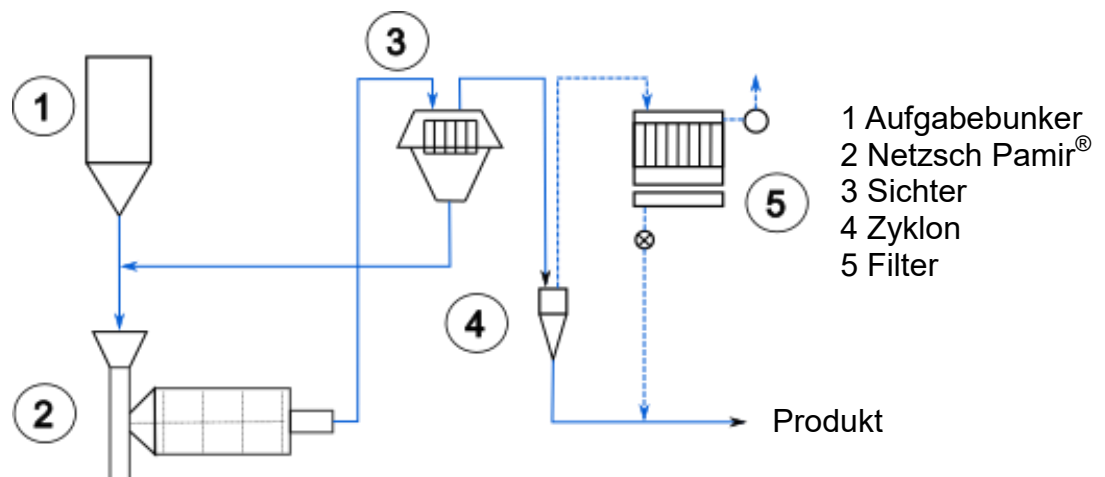


Bild 6-10 Oben: Rührwerkskugelmühle Netzsch Pamir®. Unten: Schaltbild der Mahlanlage bei Betrieb mit Sieber [ECR 2019]

In Abhängigkeit der gewählten Betriebseinstellungen (Aufgabemenge / Luftvolumenstrom) ändert sich die Beladung im Luftstrom; damit variiert der Anteil des Materials zwischen den Mahlkörpern. Während weniger Material zu einer schnelleren und intensiveren Zerkleinerung führt, kann die Effizienz bei einer höheren Materialaufgabe steigen. Es ist zu erwarten, dass sich eine ähnliche Abhängigkeit bezüglich der in der Mahlkammer enthaltenen Materialmenge zeigt, wie bereits in Kapitel 5.2 bei den diskontinuierlichen Versuchen dargestellt wurde. Für die kontinuierlichen Mahlversuche erfolgte allerdings keine zusätzliche Optimierung.

Die Mahlversuche gliederten sich in Untersuchungen im Durchlaufbetrieb und Kreislaufmahlungen mit Sieb. Als Aufgabematerialien wurden zwei der Zwischenprodukte aus der Argo-Mühle (Klinker 3-A1 und 3-A3) verwendet und ohne zusätzliche Mahlhilfen und Sulfatträger vermahlen.

Bei den Versuchen im Durchlaufbetrieb wurde die Zielfeinheit durch Variation der Aufgabemenge eingestellt (siehe auch **Tabelle 6-5**). Die maximale Feinheit im Durchlauf war deutlich limitiert (siehe auch **Bild 6-11**). Für weitere Modellrechnungen werden daher nur ausgewählte Versuchseinstellungen verwendet.

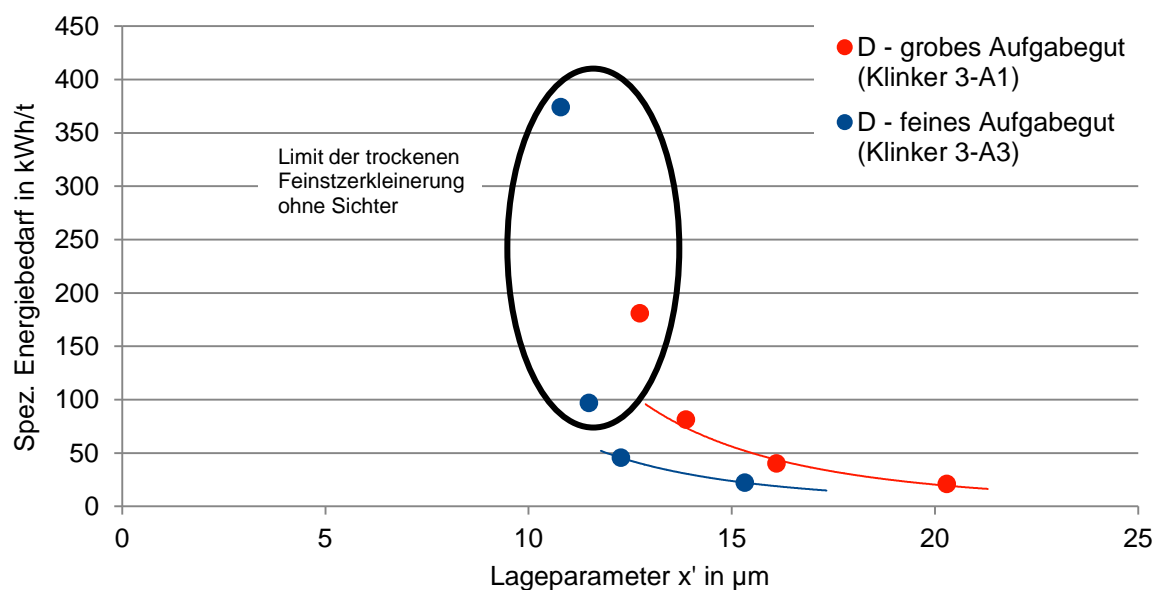


Bild 6-11 Spezifischer Energiebedarf der Feinstmahlung in der Netzsch Pamir® Rührwerkskugelmühle im Durchlaufbetrieb (D)

Tabelle 6-5 Mahlversuche in der Rührwerkskugelmühle im Durchlaufbetrieb mit vorgemahlenen Klinkermehlen

Netzsch Pamir® 30 l Mahlkammer		Klinker 3-A3 (Argo-Mühle)				Klinker 3-A1 (Argo-Mühle)			
		3-D1	3-D2	3-D3	3-D4	3-D5	3-D6	3-D7	3-D8
Definition der Feinheit ¹		Mittelfein							Grob
Anlagendurchsatz	kg/h	40	130	280	600	60	140	300	610
Sichter	1/min	-				-			
Lageparameter nach RRSB	µm	10,8	11,5	12,3	15,3	12,7	13,9	16,1	20,3
Steigungsmaß nach RRSB	-	0,89	0,87	0,93	1,03	0,96	0,96	1,02	1,05
Spez. Oberfläche nach Blaine	cm²/g	5600	4700	4220	3470	4660	4220	3530	2860
Spez. Energiebedarf (Mühle)	kWh/t	363	95	44	22	175	79	39	20

Das Maximalkorn ändert sich bei supergroben¹ Aufgabematerialien (3-A1) anfänglich noch stark (**Bild 6-12**). Mit steigender Aufgabefeinheit (3-A3, grob¹) ändert sich dies (**Bild 6-13**). Mit sinkender Aufgabemenge stagniert die Zerkleinerung im Bereich zwischen etwa 40 und 60 µm jedoch. Dieser Effekt wurde auch bei den diskontinuierlichen Versuchen beobachtet und ist sowohl material- als auch intensitätsabhängig. Wird die Rührwerkskugelmühle im Durchlauf betrieben, ist also die Feinheit des Aufgabematerials limitierend für die Produktfeinheit.

¹ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

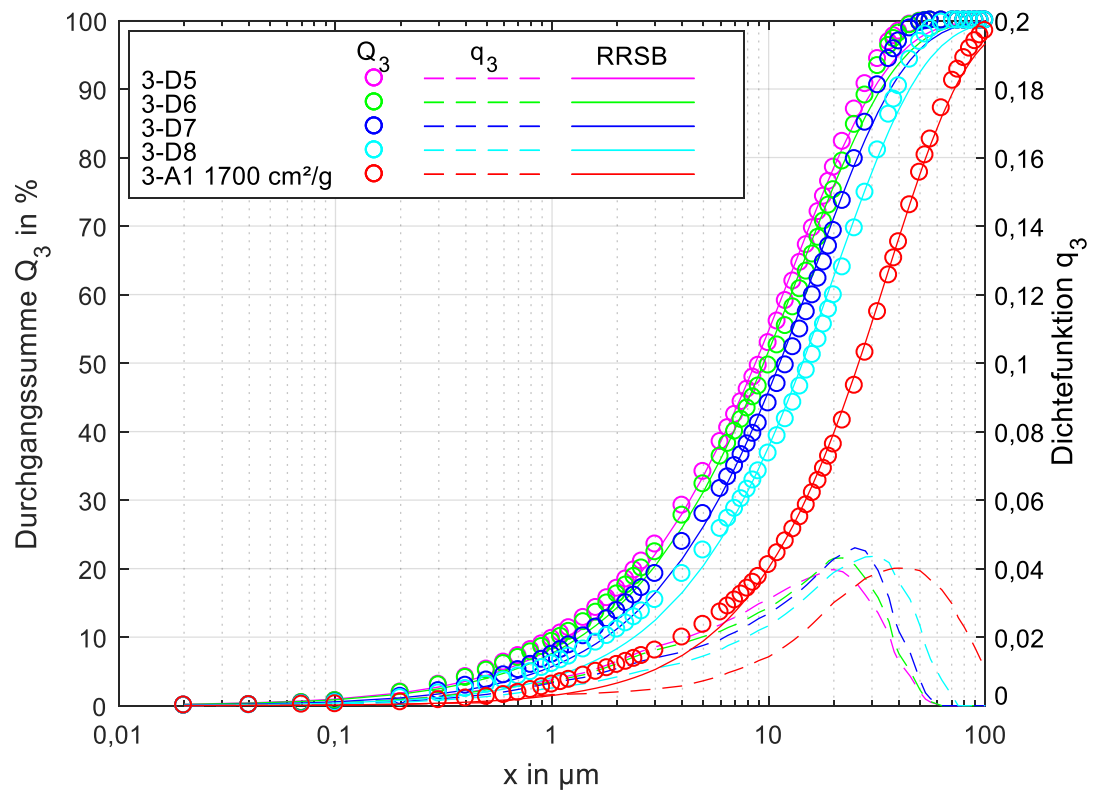


Bild 6-12 Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte gemahlen aus 3-A1 im Durchlaufbetrieb in der Netzsch Pamir® Rührwerkskugelmühle

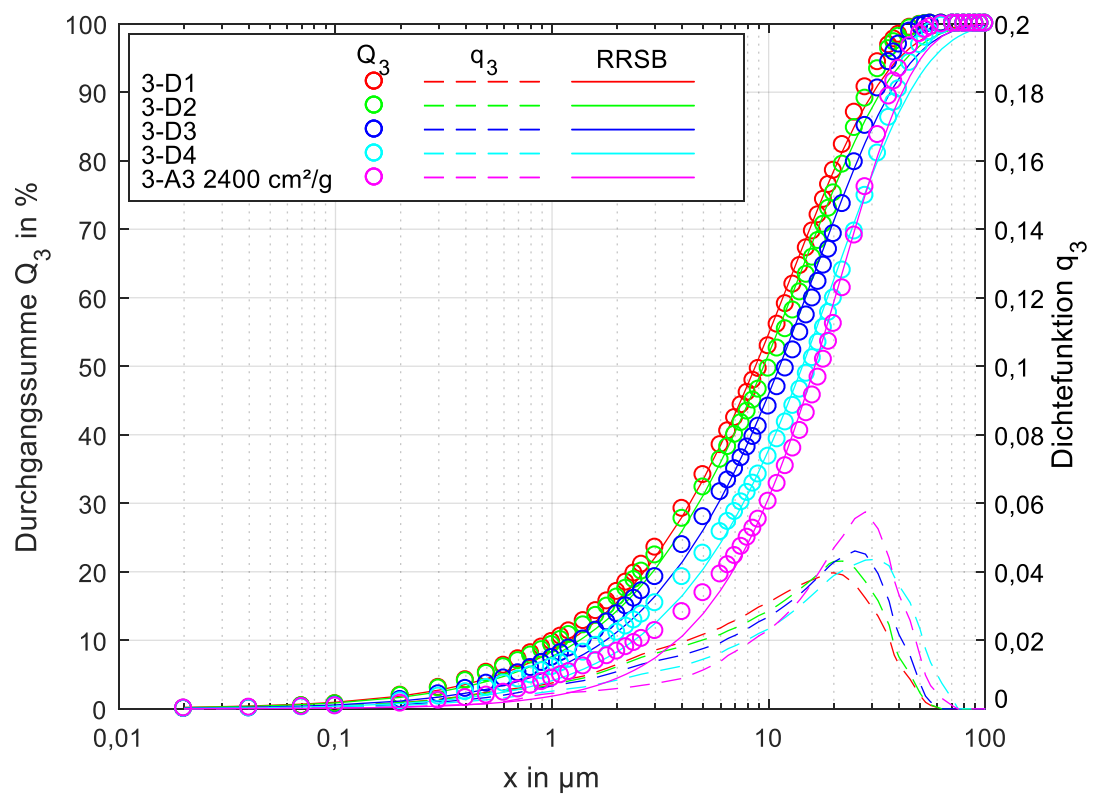


Bild 6-13 Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte gemahlen aus 3-A3 im Durchlaufbetrieb in der Netzsch Pamir® Rührwerkskugelmühle

Im zweiten Teil der Feinstmahlversuche (2. Mahlschritt) wurde die Rührwerkskugelmühle mit einem Hochleistungssichter (Netzsch Typ Bora) im Umlauf betrieben. Als Aufgabematerialien wurden wieder die Zwischenprodukte 3-A1 und 3-A3 aus dem 1. Mahlschritt verwendet. Die Korngrößenverteilungen der im 2. Mahlschritt gemahlenen Zwischenprodukte sind in **Bild B 13-7** dargestellt. Durch Änderung der Sichter-drehzahl wurde die Feinheit bei konstanter Mühlenaufgabe eingestellt. Bei Nutzung des Sichters können wesentlich höhere Feinheiten als im Durchlaufbetrieb erzielt werden. Der spezifische Energiebedarf stieg im Sichterbetrieb jedoch immens an (**Bild 6-14**).

Besonders auffällig ist der hohe spezifische Energiebedarf bei der Mahlung des ersten Zwischenprodukts bei der Umlaufmahlung (3-U4). Der Sichterbetrieb benötigt bei gleicher Produktfeinheit etwa 10 kWh/t mehr als der Durchlaufbetrieb (siehe **Bild 6-14**). Dies deutet darauf hin, dass in diesem Betriebspunkt nur noch sehr wenig Rückgut abgetrennt wird und die Mahlanlage bei dieser Einstellung mit einer zu geringen Aufgabemenge betrieben wurde. Dementsprechend fließt dieser Betriebspunkt nicht in die Modellrechnungen ein.

Der Versuch 3-U2 wurde unter Zugabe eines Mahlhilfsmittels wiederholt. Der spezifische Energiebedarf konnte um etwa 15 % reduziert werden. Aufgrund der geringen Datenlage fließt dieses Ergebnis jedoch nicht in die Modellrechnungen ein.

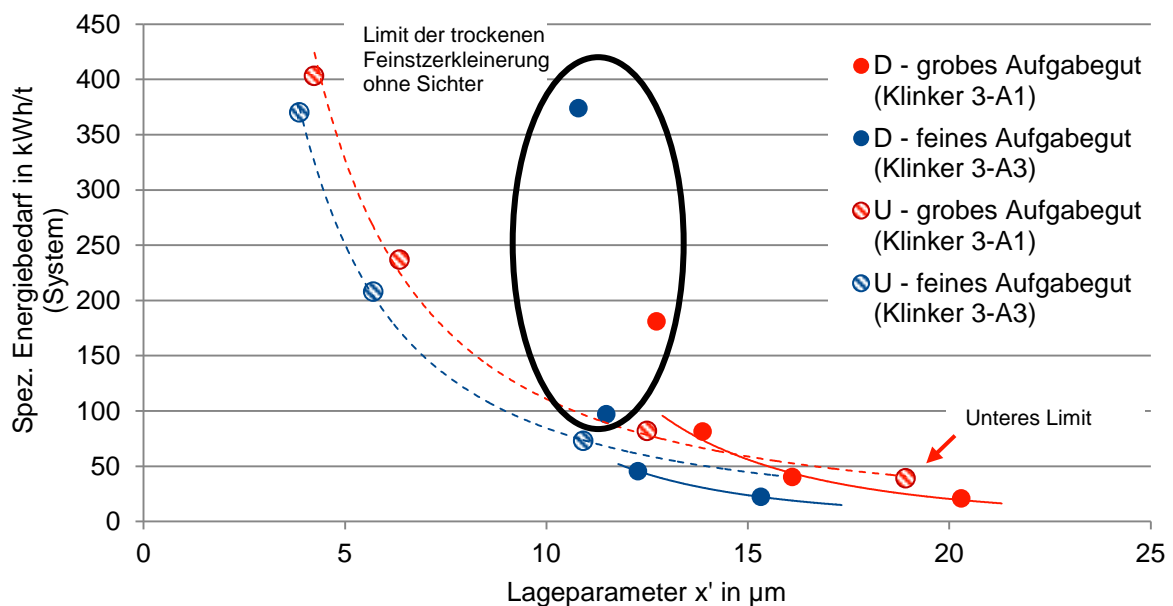


Bild 6-14 Spezifischer Energiebedarf der Feinstmahlung in der Netzsch Pamir® Rührwerkskugelmühle

Tabelle 6-6 Mahlversuche in der Rührwerkskugelmühle im Umlauf mit einem Sieb mit vorge-mahlenen Klinkern

Netzsch Pamir® 30 l Mahlkammer		Klinker 3-A3 (Argo-Mühle)				Klinker 3-A1 (Argo-Mühle)			
		3-U1	3-U2	3-U2 ²⁾	3-U3	3-U4	3-U5	3-U6	3-U7
Definition der Feinheit ³⁾		Super- fein	Fein		Mittel fein	Fein		Mittelfein	
Anlagen- durchsatz	kg/h	37	88	102	220	30	70	200	420
Sichter	1/min	4000	2500		1500	4000	2500	1500	1100
Lageparameter nach RRSB	µm	3,9	5,7	5,9	10,9	4,2	6,4	12,4	18,9
Steigungsmaß nach RRSB	-	1,22	1,05	1,05	0,93	1,27	1,03	1,02	1,23
Spez. Oberflä- che nach Blaine	cm ² /g	10320 ¹	7560 ₁ ¹	7150 ¹	4800	9950 ¹	7090 ¹	4400	2740
Spez. Energie- bedarf (Mühle)	kWh/t	240	146	119	56	273	167	62	29
Spez. Energie- bedarf (System)	kWh/t	370	208	167	73	403	237	82	39

¹⁾ Außerhalb des Messbereichs

²⁾ Versuch mit Zugabe eines Mahlhilfsmittels

³⁾ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

7 Modellbildung zur Optimierung der Mischungsanteile aus der separaten Feinstmahlung

7.1 Modell zur Identifikation optimaler Mischungsverhältnisse

Um eine gewünschte Korngrößenverteilung (nachfolgend Referenz-Korngrößenverteilung) durch Mischung herzustellen, gibt es, in Abhängigkeit der verfügbaren Mischungskomponenten, eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Zur Auswahl geeigneter Mischungen wurde daher ein Modell entwickelt (siehe auch **Bild 7-1**).

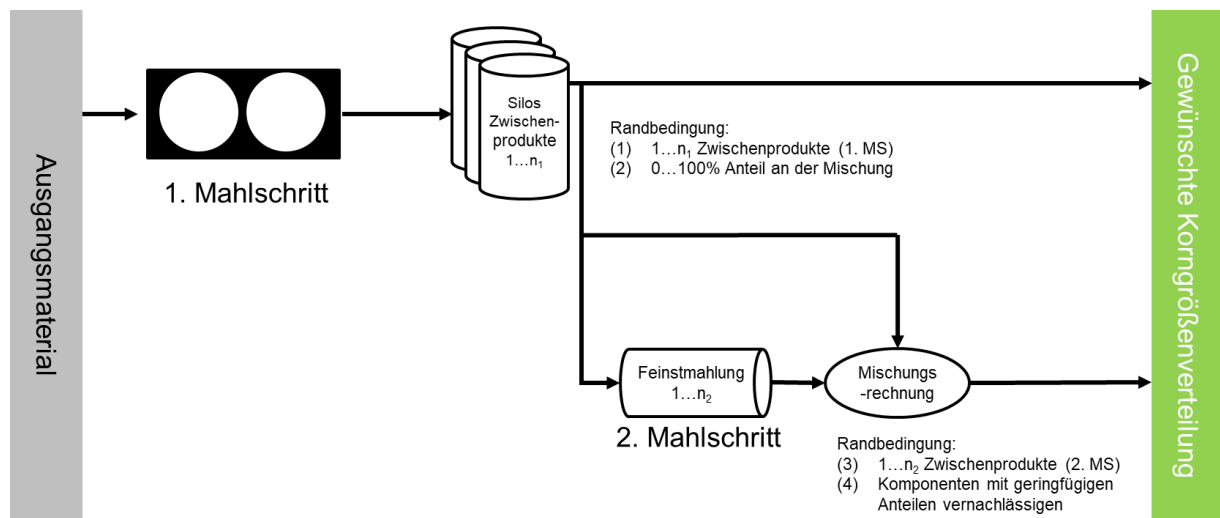


Bild 7-1 Visualisierung des Modells zur Nachbildung der separaten Feinstmahlung und der Randbedingungen

Als Kern des Modells wird eine einfache Mischungsrechnung genutzt (**Gleichung 5**). Aus den gegebenen Mischungsanteilen (φ) und den Durchgangssummen (Q_3) der verfügbaren Korngrößenverteilungen (n) wird die Korngrößenverteilung der Mischung berechnet.

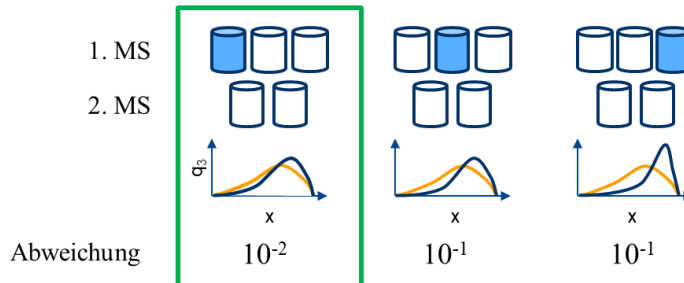
$$Q_{3,Modell} = \sum_n Q_{3,n} * \varphi_n \quad \text{Gleichung 5}$$

Zur Gegenüberstellung von zwei Korngrößenverteilungen wird die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung als Kennwert berechnet (siehe Kapitel 7.2). Diese Abweichung wird im Modell durch einen Optimierungsansatz minimiert und so die bestmögliche Zusammensetzung identifiziert.

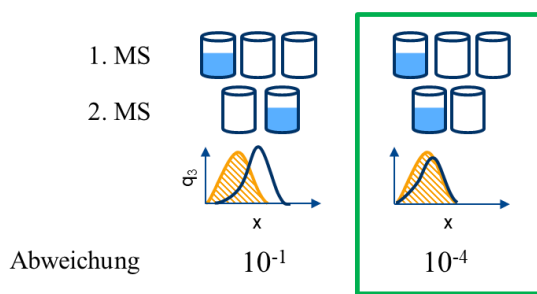
Modellansatz

Voruntersuchungen (Kapitel D) haben gezeigt, dass der Materialanteil aus dem 2. Mahlschritt gesteigert werden kann, wenn ein Mindest-Materialanteil aus dem 1. Mahlschritt durch eine Randbedingung vorgegeben wird. Hierdurch können der spezifische Energiebedarf und die Abweichung der Mischung beeinflusst werden.

1. Schritt: 1. Mahlschritt (Anteil min x %)



2. Schritt: 2. Mahlschritt Berechnung einer virtuellen Korngrößenverteilung zur Repräsentation des fehlenden Anteils



Ergebnis der Optimierung

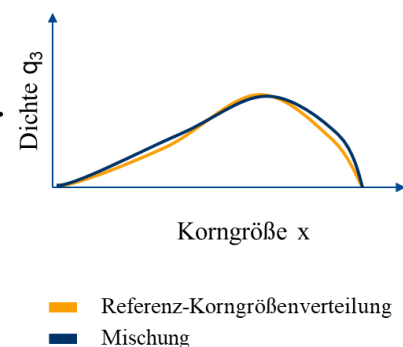


Bild 7-2 Visualisierung des Modellansatzes

Der hier vorgeschlagenen Berechnungsansatz beinhaltet eine zweistufige Vorgehensweise (**Bild 7-2**):

1. Im ersten Berechnungsschritt werden nur die Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (1. MS) für die Annäherung an die Referenz-Korngrößenverteilung verwendet. Das Ergebnis ist die Korngrößenverteilung (KGV) einer ersten Mischung. Diese stimmt jedoch oft, aufgrund des fehlenden Feinstanteils, nicht mit den Referenz-Korngrößenverteilungen überein. **Bild 7-3** zeigt die Dichteverteilung der Referenz-Korngrößenverteilung und die virtuelle Mischung der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt als relative Häufigkeitsverteilung mit einem Materialanteil von etwa 48 %.

2. Im zweiten Berechnungsschritt wird zunächst eine neue virtuelle Referenz-Korngrößenverteilung berechnet. Diese entspricht den noch fehlenden Partikeln in der Mischung aus dem ersten Berechnungsschritt. **Bild 7-3** zeigt die relative Häufigkeitsverteilung der fehlenden Korngrößenverteilung mit einem Materialanteil von 52 %. Eine geeignete Zusammensetzung der zweiten Mischung wird berechnet. Im Unterschied zum ersten Schritt der Berechnung werden alle Korngrößenverteilungen (aus dem 1. und 2. Mahlschritt) genutzt.

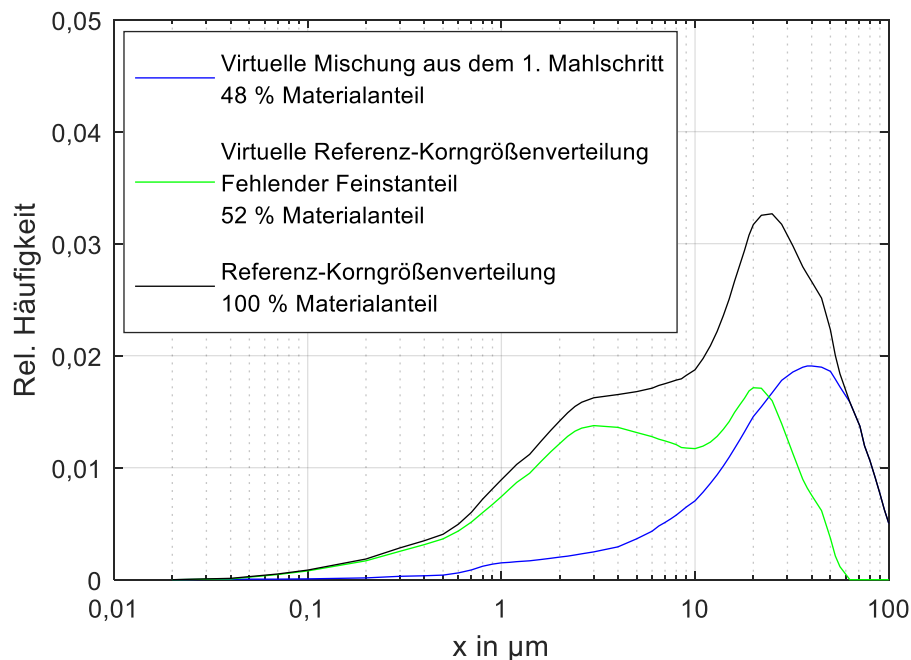


Bild 7-3 Bestimmung der neuen virtuellen Referenz-Korngrößenverteilung zur Quantifizierung des fehlenden Feinstbereichs

Die Verwendung der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt kann im zweiten Berechnungsschritt den Gesamtanteil der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt erhöhen. Überschneidungen der Korngrößenverteilungen zwischen den Zwischenprodukten aus dem 1. und dem 2. Mahlschritt werden im ersten Berechnungsschritt nicht berücksichtigt. Um Wechselwirkung zu reduzieren und die Abweichung der Mischung so gering wie möglich zu halten werden beide berechneten Mischungen durch eine weitere Modellrechnung gewichtet.

Der spezifische Energiebedarf (**Gleichung 6**) zur Mahlung der Zwischenprodukte (ZP) aus dem 1. Mahlschritt ergibt sich aus dem Produkt der Anteile der Zwischenprodukte (α_i) und dem spezifischen Energiebedarf zur Mahlung dieser ($E_{ZP1,i}$). Analog dazu wird der spezifische Energiebedarf zur Mahlung der Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt hinzugefügt. Um die Zerkleinerungshistorie des Mahlguts vollständig darzustellen, muss jedoch der Energieaufwand aus dem 1. Mahlschritt hinzugefügt werden ($E_{ZP1,i} + E_{ZP2,i,j}$).

$$E_{Mischung} = \sum_{i=1}^{n_{ZP1}} \left(E_{ZP1,i} \times \alpha_i + \sum_{j=1}^{n_{ZP2}} (E_{ZP1,i} + E_{ZP2,i,j}) \times \beta_{i,j} \right) \quad \text{Gleichung 6}$$

Legende	Anzahl	Index	Anteil
1. MS	n_{ZP1}	i	α
2. MS	n_{ZP2}	j	β
Spez. Energiebedarf:			E

7.2 Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung

Um den Unterschied zwischen der Mischungs- und der Referenz-Korngrößenverteilung beschreiben zu können, wird die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung (σ) nach **Gleichung 7** berechnet. Zunächst wird die Differenz zwischen der Durchgangssumme der Referenz-Korngrößenverteilung ($Q_{Ref,3}$) und der Korngrößenverteilung der berechneten Mischung ($Q_{Mischung,3}$) in jedem der 100 Messpunkte (a) bestimmt (siehe auch **Bild 7-4** unten). Aus der Summe der Abweichungsquadrate wird Wurzel berechnet.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{a=1}^{100} (Q_{Ref,3,a} - Q_{Mischung,3,a})^2} \quad \text{Gleichung 7}$$

Wie **Bild 7-4** (unten) exemplarisch darstellt, wird der fehlende Feinstbereich der Mischung durch positive Werte dargestellt. Negative Werte zeigen eine Überrepräsentation bestimmter Teile der Korngrößenverteilung (hier des Grobbereichs). Mit dieser Information kann in weiteren Optimierungsschritten gezielt der fehlende Bereich angepasst werden.

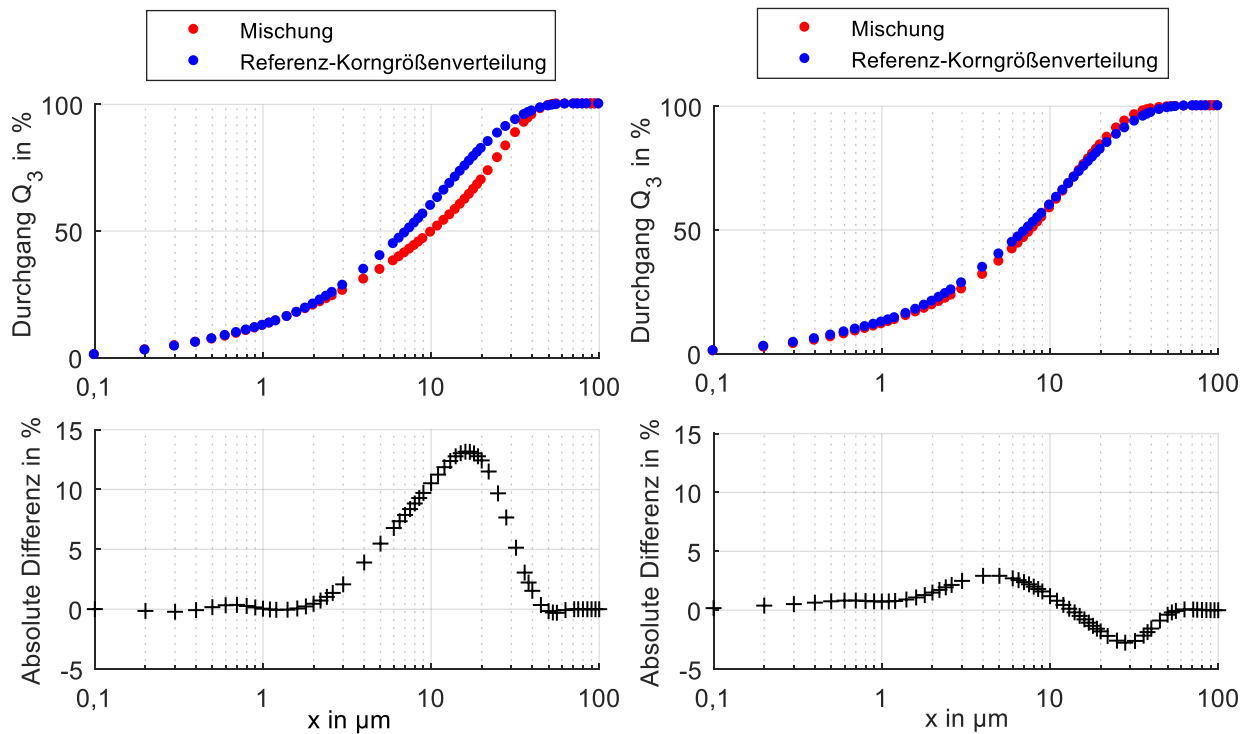


Bild 7-4 Darstellung der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung in den einzelnen Messstellen. Links: Geringe Güte. Rechts: Relativ hohe Güte

Da die Korngrößen der Korngrößenverteilung in der Regel nicht gleichverteilt von der Software des Lasergranulometer ausgegeben werden, kann es sinnvoll sein diese Gewichtung zu eliminieren. Meist werden mit steigender Partikelgröße weniger Stützstellen zur Beschreibung verwendet. Da der Feinstbereich in dem hier beschriebenen Ansatz von Interesse ist, wurde diese Gewichtung beibehalten. Eine zusätzliche Gewichtung kann sinnvoll sein, wenn bestimmte Bereiche der Referenz-Korngrößenverteilung, beispielsweise zur Verbesserung der Zementeigenschaften, besser repräsentiert werden sollen.

7.3 Berechnung der Anteile der Zwischenprodukte

Die nötigen Mischungsanteile werden über einen Optimierungsansatz berechnet. Dieser minimiert die Abweichung der Mischung durch Variation der Anteile der Mischungskomponenten (1. Mahlschritt: α , 2. Mahlschritt: β) nach **Gleichung 8**.

$$\min \left(\sqrt{\sum_{a=1}^{100} \left(Q_{Ref,3,a} - \sum_{i=1}^{n_{ZP1}} \left(Q_{ZP1,3,a,i} \times \alpha_i + \sum_{j=1}^{n_{i,ZP2}} Q_{ZP2,3,a,i,j} \times \beta_{i,j} \right) \right)^2} \right) \quad \text{Gleichung 8}$$

Legende	Anzahl	Index	Anteil
1. MS	n_{ZP1}	i	α
2. MS	n_{ZP2}	j	β
Kornklasse der Korngrößenverteilung:			a
Referenz-Korngrößenverteilung:			$Q_{Ref,3,a}$
Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte aus dem 1. und 2. MS:			$Q_{ZP1,3}, Q_{ZP2,3}$

Als Optimierungsverfahren wird in der vorliegenden Arbeit das Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead genutzt [Lag; Ree; Wri; Wri 1998]. Die Genauigkeit des Verfahrens ist stark von der Anzahl der Iterationen abhängig. Diese ist im Modellsatz auf maximal 2500 begrenzt. Bei Konvergenz der Berechnung wird bereits vorher abgebrochen. Es hat sich gezeigt, dass eine höhere Anzahl an Iterationen keine signifikante Verbesserung des Ergebnisses bringt. Das Downhill-Simplex-Verfahren ist gegenüber anderen Verfahren zur Lösung nicht-linearer Probleme (z.B. Newton-Verfahren) besonders robust [Gis 2011]. Es zeigt sich zudem kein ausgeprägtes Startwertproblem.

7.4 Randbedingungen und deren Einflüsse

Wird das Modell ohne Randbedingungen verwendet, werden oft Mischungszusammensetzungen berechnet die aus praktischen Gründen schwierig herzustellen sind. **Tabelle 7-1** fasst die verwendeten Randbedingungen zusammen.

Tabelle 7-1 Kurzbeschreibung der Randbedingungen

Name	Kurzbeschreibung
$RB_{n,ZP1}$	Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt.
$RB_{n,ZP2}$	Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt.
$RB_{\omega,ZP1}$	Summe des minimalen Anteils der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt.
$RB_{\omega,min}$	Anteil des Zwischenprodukts, der mindestens enthalten sein muss. Geringere Anteile werden vernachlässigt.

1. Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 1. und 2. Mahlschritt

Bei Überlappung der Korngrößenverteilung der Zwischenprodukte werden oft sehr viele der Zwischenprodukte verwendet. Um die Anzahl der Zwischenprodukte zu steuern, wurden zwei Randbedingungen implementiert. $RB_{n,ZP1}$ gibt die maximal zu verwendende Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt an. Analog dazu gibt $RB_{n,ZP2}$ die maximale Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt in der Mischung vor.

Anmerkung: Im zweiten Berechnungsschritt können nur Zwischenprodukte verwendet werden, die entweder bereits im 1. Berechnungsschritt verwendet wurden (Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt) oder aus diesen im 2. Mahlschritt nachgemahlen wurden.

2. Vorgabe des Anteils der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt

In der Modellrechnung werden primär die Zwischenprodukte mit der höchsten Übereinstimmung zu der Referenz-Korngrößenverteilung genutzt. In vielen Fällen eignen sich die Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt besser als die aus dem 1. Mahlschritt, da diese oft breitere Korngrößenverteilungen haben und feiner sind. Um den spezifischen Energiebedarf zu reduzieren ist es nötig, den Materialanteil aus dem 1. Mahlschritt in der Mischung zu maximieren. Der Mindestanteils des Materials aus dem 1. Mahlschritt wird durch $RB_{\omega,ZP1}$ festgelegt.

Bild 7-5 stellt den Einfluss von $RB_{\omega,ZP1}$ und $RB_{n,ZP1}$ auf die Abweichung dar. Eine beliebige Mischung einer Referenz-Korngrößenverteilung wurde 84 Mal mit geänderten Randbedingungen gerechnet. $RB_{\omega,ZP1}$ von 0% bis 50 % und $RB_{n,ZP1}$ wurde zwischen 1 und 2 variiert.

Folgendes wurde beobachtet:

- Ist $RB_{\omega,ZP1}$ nicht gesetzt (links im Bild) ist der Anteil der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt sehr gering, wodurch eine sehr geringe Abweichung (im Diagramm rot dargestellt) erreicht wird.
- Bei schrittweiser Erhöhung von $RB_{\omega,ZP1}$, steigt der Materialanteil aus dem 1. Mahlschritt.
 - Mit steigender $RB_{\omega,ZP1}$ steigt die Abweichung.
- Bei Verwendung eines Zwischenprodukts aus dem 1. Mahlschritt ist der verwendete Materialanteil höher als bei Verwendung von zwei Zwischenprodukten.
- Durch die zwangsweise Mischung von zwei Zwischenprodukten aus dem 1. Mahlschritt sinkt der insgesamt verwendete Materialanteil aus dem 1. Mahlschritt.
- Mit zwei verwendeten Zwischenprodukten aus dem 1. Mahlschritt ist oft eine niedrigere Abweichung erreichbar als mit nur einem Zwischenprodukt. Der Unterschied ist jedoch sehr gering.
- Andere Randbedingungen wurden ebenfalls variiert, diese hatten allerdings nur einen geringen Einfluss.

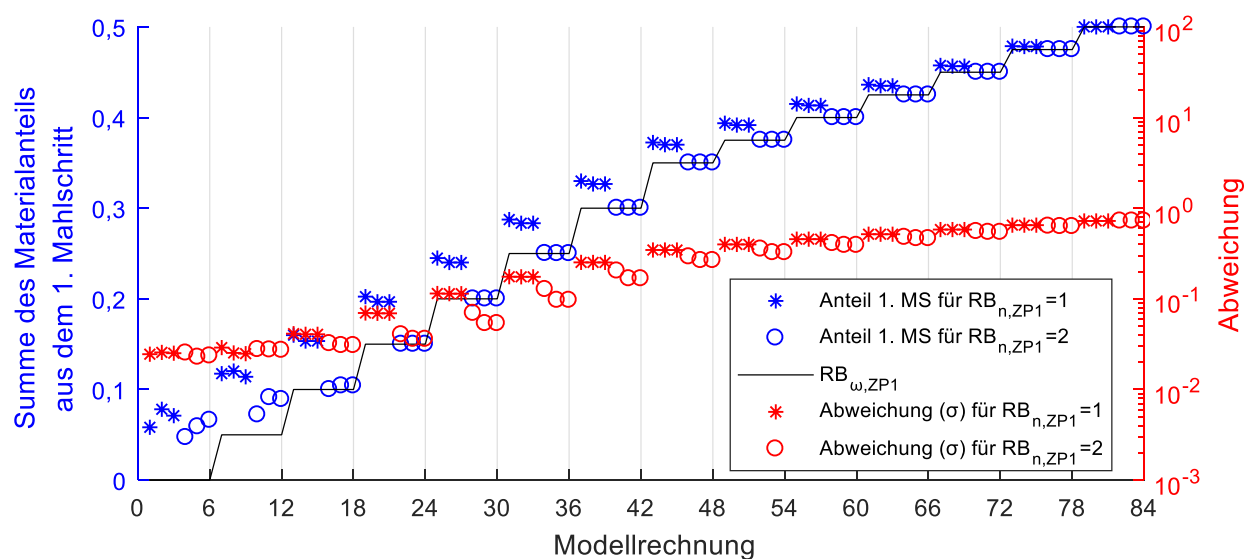


Bild 7-5 Beispiel zum Einfluss der Randbedingung zur Vorgabe des Anteils der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt

3. Vernachlässigung geringfügiger Anteile

Wird durch das Modell ein geringerer Anteil für eines der Zwischenprodukte berechnet als durch $RB_{\omega, \min}$ vorgegeben, wird dieses Zwischenprodukt aus der Mischungszusammensetzung entfernt und die Mischungszusammensetzung normiert. Materialanteile kleiner als 1 % werden in den Modellrechnungen als geringfügig angesehen, daher ist durch die Normierung ein vernachlässigbar kleiner Fehler zu erwarten. Im betrieblichen Alltag kann dieser Wert zum Beispiel auch auf die Messtoleranz von Wägeeinrichtungen bezogen werden.

7.5 Validierung der Mischungsrechnung

Die Güte der Mischung hängt stark vom Ablauf der Mischungsherstellung ab. Um zufällige Fehler bei der Mischung der Einzelkomponenten zu verringern, wurden die Zwischenprodukte homogenisiert, Teilmengen entnommen, separat abgewogen und in einem Taumelmischer gemischt, bevor weitere Untersuchungen erfolgten. Für die Laboruntersuchungen wurden aus den Mischungen, durch mehrerer Teilungs- und Homogenisierungsschritte, repräsentative Probemengen entnommen.

Die Messung von Korngrößenverteilungen durch Laserbeugung ist anhängig von der Feinheit der Proben. Dies kann dazu führen, dass Mischungen durch die Messmethode anders dargestellt werden als die berechnete Mischung, wenn die Korngrößenverteilungen der Mischungskomponenten einzeln bestimmt werden. Um dies auszuschließen wurden 16 Mischungen aus den erzeugten Zwischenprodukten hergestellt, anschließend gemessen und mittels Fraunhofer-Näherung berechnet.

Die Differenzen der Summenverteilungen zwischen den gemessenen Korngrößenverteilungen der Mischungen und den durch die Mischungsrechnung berechneten Korngrößenverteilungen werden in **Bild 7-6** dargestellt (siehe auch **Tabelle A-13-7**). Wurden mehr Partikel gemessen als berechnet, so ist der Zahlenwert positiv. Negative Zahlenwerte zeigen dementsprechend, dass die Mischungsrechnung mehr Partikel in dieser Kornklasse berechnet hat als durch die Messung bestimmt werden konnte.

Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Korngrößenverteilungen befinden sich im Bereich von etwa +1,5 % und - 2,5 % und sind damit als geringfügig einzuschätzen. Die anfänglich genannten Bedenken hinsichtlich der Feinheitsabhängigkeit wurden damit zumindest für das hier verwendete Lasergranulometer und den untersuchten Feinheitsbereich widerlegt. Für Lasergranulometer anderer Hersteller, bei Verwendung anderer Geräteeinstellungen oder generell anderer Messtechniken ist dies allerdings erneut zu prüfen.

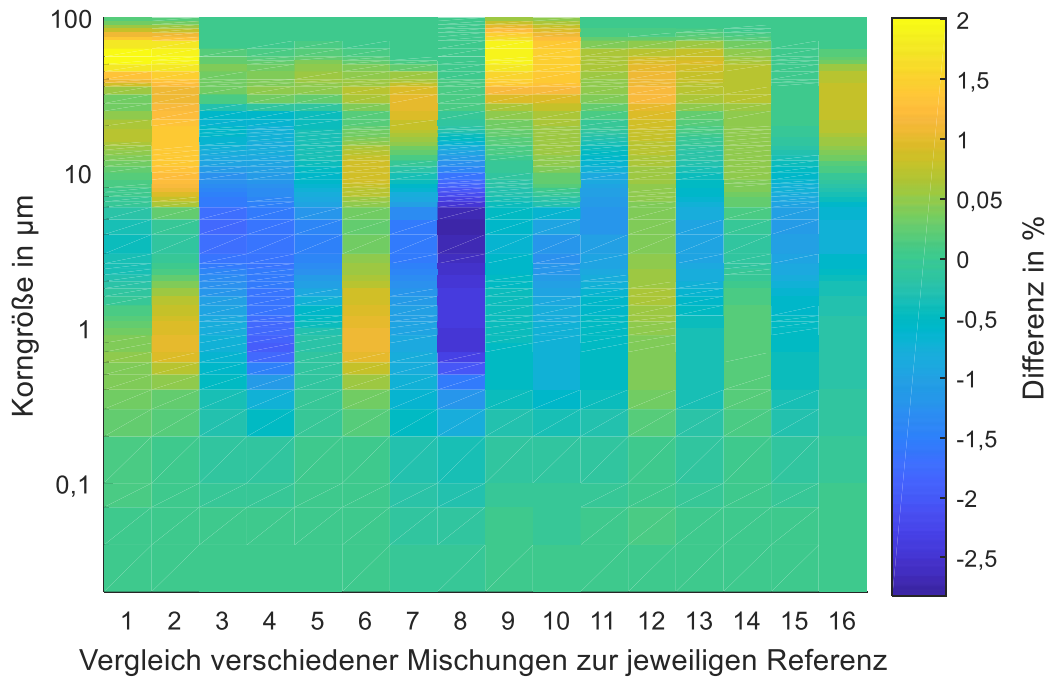


Bild 7-6 Darstellung der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung zwischen der analysierten Mischung und der berechneten Korngrößenverteilung

Sind gemessene und berechnete Korngrößenverteilung nicht identisch, hat dies auch einen Einfluss auf das Steigungsmaß (**Bild 7-7**). Es zeigt sich eine Unterbewertung des Steigungsmaßes durch die Mischungsrechnung. Bei der Charakterisierung der Mischung werden weniger grobe Partikel gemessen, als in den Einzelmessungen der Mischungskomponenten bestimmt wurde. Daher ist die Korngrößenverteilung der Mischung im Vergleich zur Mischungsrechnung enger. Das Steigungsmaß zur Charakterisierung der Breite der Korngrößenverteilung ist ein sehr sensibler Parameter und wird selbst durch kleine Änderungen in der Korngrößenverteilung signifikant beeinflusst. Deutliche Auswirkungen auf den Lageparameter wurden jedoch nicht festgestellt.

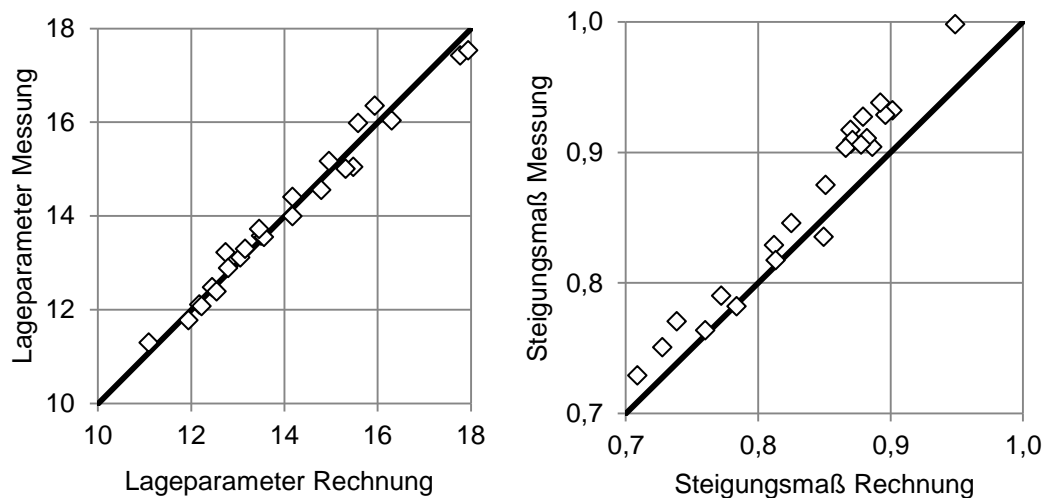


Bild 7-7 Auswirkungen der Mischungsrechnung auf Lageparameter (links) und Steigungsmaß (rechts) nach RRSB

8 Kleintechnische Untersuchungen

8.1 Modellrechnungen und Herstellung der Mischungen

Durch Modellrechnungen wurden die Produkte aus den Referenzmahlungen in der Kugelmühlen-Umlaufmahanlage sowie auch die typischen Korngrößenverteilungen von CEM I-Zementen der Festigkeitsklassen 32,5, 42,5 und 52,5 (siehe auch **Tabelle 6-3**) nachgebildet. Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden durch Variation der Randbedingungen (**Tabelle 8-1**) beeinflusst. Um den Einfluss der Abweichung der Korngrößenverteilung auf die Zementeigenschaften zu bestimmen, wurden Mischungen mit unterschiedlichen Abweichungen für Mörteluntersuchungen ausgewählt. Hieraus wurde ein Grenzwert für die Abweichung bestimmt.

Tabelle 8-1 Wertebereich der Randbedingungen für die Modellrechnungen

Randbedingung	Wertebereich
$RB_{n,ZP1}$	1, 2, max ¹⁾
$RB_{n,ZP2}$	1, 2, max ¹⁾
$RB_{\omega,ZP1}$	0...100 %
$RB_{\omega,min}$	1 %

¹⁾ Max. entspricht der Anzahl maximal verfügbarer Zwischenprodukte

Neben der Anzahl der Zwischenprodukte wurde bei den Modellrechnungen auch deren Zusammensetzung variiert (siehe auch **Tabelle 8-2**), um den Einfluss der Feinheit der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt auf die Abweichung der Mischung der Korngrößenverteilung (σ) zu untersuchen.

- In der ersten Modellrechnung (1A bzw. 2A) wurden nur die beiden größten Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (ZP_{MS1}) und die daraus im 2. Mahlschritt feinstgemahlenen Zwischenprodukte (ZP_{MS2}) verwendet.
- In einer zweiten Modellrechnung (1B bzw. 2B) wurde, zusätzlich zu den bereits genutzten Zwischenprodukten, ein weiteres grobes ZP_{MS1} (mit einer spezifischen Oberfläche von 3000 cm²/g) sowie auf dessen Basis hergestellte ZP_{MS2} genutzt.
- Anschließend wurde in einer dritten Modellrechnung das mittelfeine ZP_{MS1} (etwa 4400 cm²/g nach Blaine) und die daraus hergestellten ZP_{MS2} ergänzt und die Modellrechnung wiederholt (1C bzw. 2C).

Tabelle 8-2 Beschreibung der Zwischenprodukt-Zusammensetzungen für Klinker 1 und 2

Bezeichnung	Spez. Oberfläche der ZP_{MS1} ¹⁾ in cm ² /g	Anzahl ZP_{MS1}	Anzahl ZP_{MS2}
1A / 2A	2200, 2600	2	11
1B / 2B	2200, 2600, 3000	3	15
1C / 2C	2200, 2600, 3000, 4400	4	18

¹⁾ Charakterisierung der einzelnen Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt siehe auch **Tabelle A-13-4**.

Bild 8-1 zeigt den Einfluss des Materialanteils aus dem 2. Mahlschritt auf die Abweichung am Beispiel für Klinker 1. $RB_{\omega,ZP1}$ wurde variiert. Die Korngrößenverteilungen des mittleren Zementes CEM I 32,5 (unten) sowie der Referenzmahlung in der Kugelmühle (oben) wurden nachgebildet. Die Ergebnisse für die mittleren Zemente CEM I 42,5, CEM I 52,5 sowie für Klinker 2 sind im Anhang in **Bild B 13-4** bis **Bild B 13-6** zu finden.

Wird zunächst die Modellrechnung zur Nachbildung des Referenzprodukts aus der Kugelmühle betrachtet (**Bild 8-1** oben), so zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den ausgewählten Zwischenprodukten aus dem 1. Mahlschritt und der Abweichung. Werden nur grobe¹ Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (1A und 1B) verwendet, können geringe Abweichungen nicht erreicht werden. Durch die Erhöhung der Feinheit der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (1C, grob und mittelfein¹) können niedrige Abweichungen erreicht werden. Wird der Materialanteil aus dem 2. Mahlschritt erhöht, stellt sich im Beispiel ein Optimum der Abweichung bei etwa 50 % Materialanteil aus dem 2. Mahlschritt ein. Wird zwangsweise mehr Material aus dem 2. Mahlschritt hinzugefügt, steigt die Abweichung wieder, da der Grobbereich der Korngrößenverteilung nicht mehr ausreichend repräsentiert werden kann.

Bild 8-1 (unten) zeigt die Modellrechnung zur Nachbildung der Korngrößenverteilung des CEM I 32,5. Die berechneten Abweichungen des CEM I 32,5 streuen deutlich weniger als bei der Nachbindung der Referenzmahlungen. Darüber hinaus ist weniger Material aus dem 2. Mahlschritt nötig. Bereits mit groben Zwischenprodukten aus dem 1. Mahlschritt (1A bzw. 2A) können relativ gute Mischungen hergestellt werden. Durch die Verfügbarkeit mittelfeiner¹ Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (wie bei 1C bzw. 2C) kann der Anteil der Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt reduziert werden, was sich positiv auf den Energiebedarf auswirkt. Dementsprechend können Zemente mit niedrigeren Feinheiten ohne Material aus dem 2. Mahlschritt hergestellt werden.

¹ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

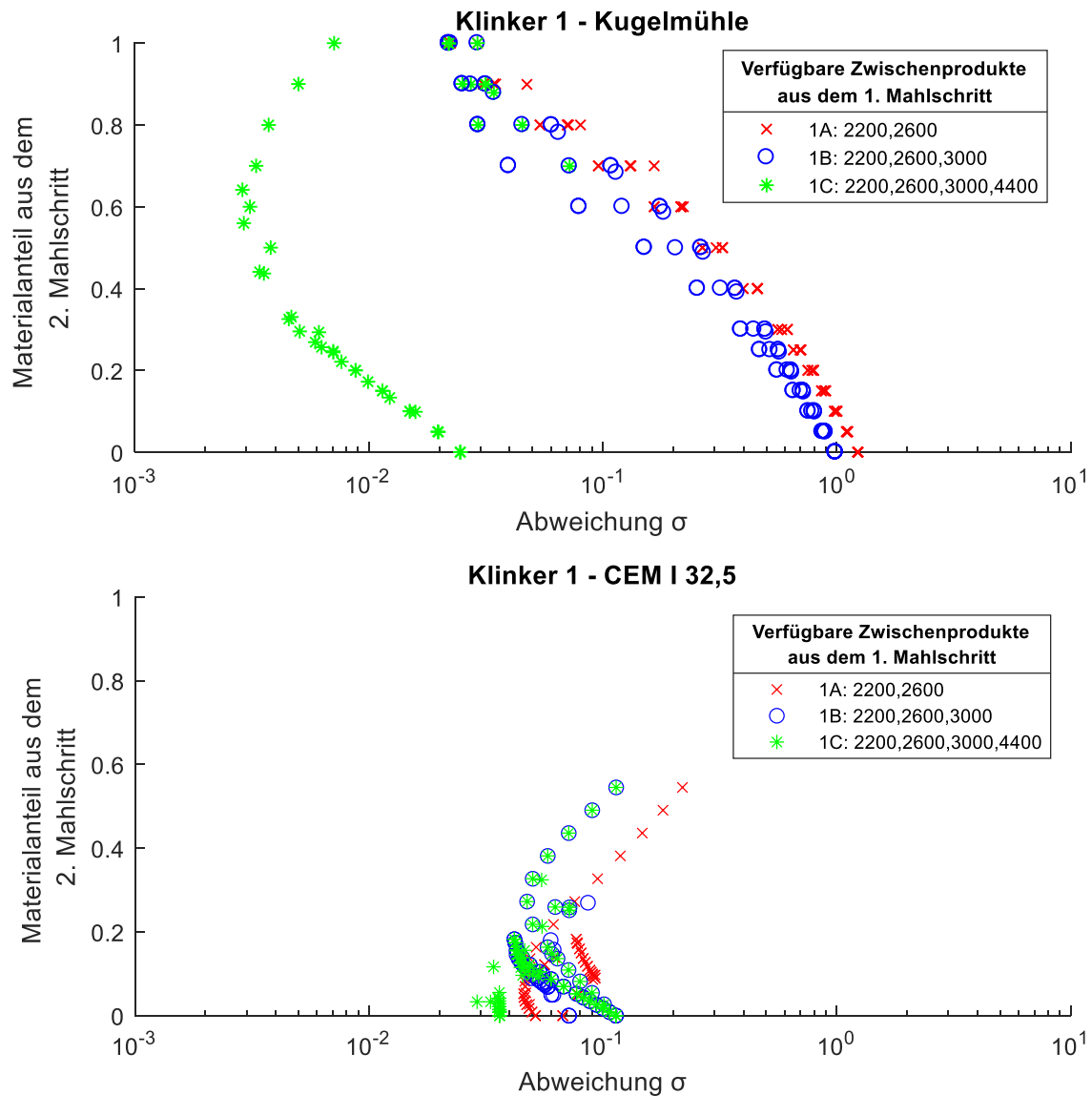


Bild 8-1 Einfluss des Materialanteils aus dem 2. Mahlschritt auf die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung. Oben: Nachbildung des Referenzmaterials der Kugelmühle. Unten: Nachbildung eines CEM I 32,5

Es ist jedoch zu beachten, dass nicht nur ausreichend feine Zwischenprodukte zur Mischung zur Verfügung stehen müssen, sondern auch der Grobbereich der nachzubildenden Korngrößenverteilung gut repräsentiert werden muss. Der CEM I 32,5 enthält wesentlich größere Partikel als die größten Zwischenprodukte beider Klinker aus dem 1. Mahlschritt. Das Maximalkorn ist dementsprechend wichtig für die Nachbildung einer Korngrößenverteilung. Für weiterführende Untersuchungen wird empfohlen, das Maximalkorn des größten Zwischenproduktes (aus dem 1. Mahlschritt) an das Maximalkorn der Referenz-Korngrößenverteilung anzupassen. Hier eignet sich zum Beispiel die Betrachtung der Durchgangswerte bei 90%.

Bei der Bewertung des spezifischen Energiebedarfs, stellt sich bei Nutzung kleintechnischer Anlagen die Frage der Skalierbarkeit der Anlagen. Der gemessene spezifische

Energiebedarf der verwendeten Vertikal-Wälzmühle (**Tabelle A-13-4**) wich um Größenordnungen von dem spezifischen Energiebedarf industrieller Anlagen ab und lag damit im Bereich der kleintechnischen Rührwerkskugelmühle (**Tabelle A-13-8**). Eine belastbare Aussage über den spezifischen Energiebedarf der Mischungen kann daher nicht getroffen werden. Der spezifische Energiebedarf wird in Kapitel 9 weiter betrachtet.

8.2 Zementeigenschaften

Obwohl bei gleichen Korngrößenverteilungen auch davon ausgegangen werden kann, dass die Zemente die gleichen Eigenschaften unabhängig vom Mahlverfahren aufweisen [Mül 2000], gilt es dennoch zu evaluieren, welchen Einfluss die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung auf die Zementeigenschaften hat. 13 berechnete Mischungen wurden für jeden Klinker ausgewählt (**Bild 8-2**, siehe auch **Tabelle A-13-20** und **Tabelle A-13-23**). Die Zusammensetzungen der Mischungen wurden durch Modellrechnungen bestimmt.

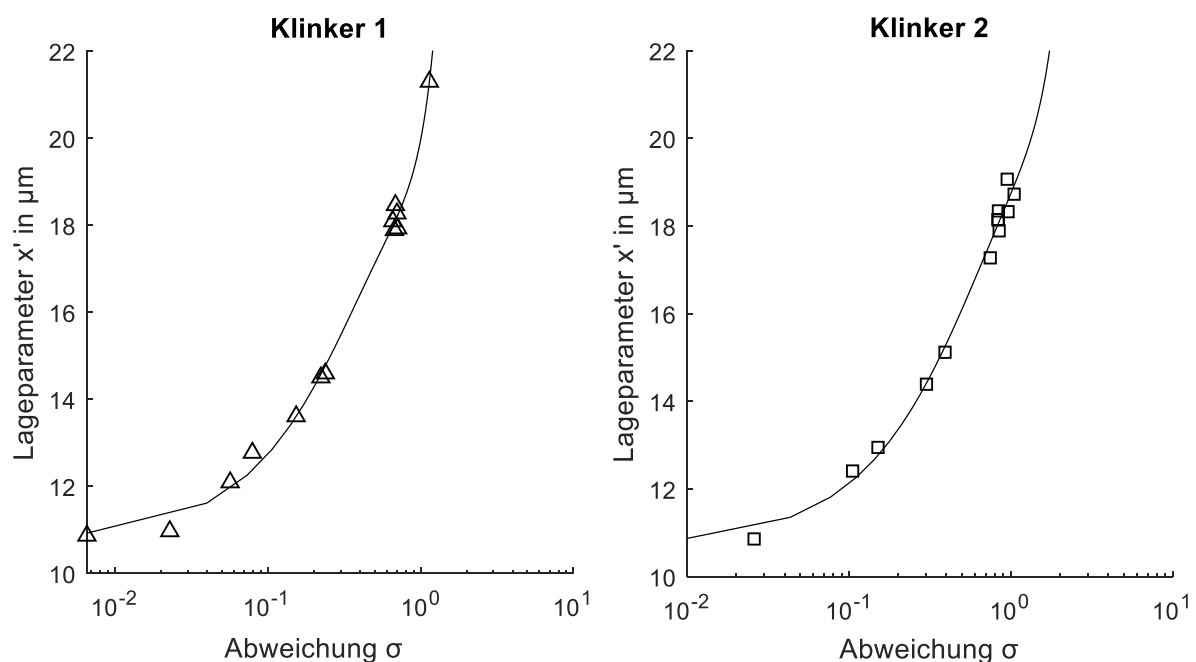


Bild 8-2 Auswahl der Mischungen aus den Modellrechnungen auf Basis der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung zur Mahlung in der Kugelmühle

Für den Feinheitsbereich der Referenzmahlungen in der Kugelmühle wurden die Anteile der Sulfatträger für Klinker 1 und 2 optimiert. Da die Sulfatträgerentwässerung bei Technikumsanlagen oft nicht ausreichend ist, wurden die Sulfatträger bei der Mischung der Zwischenprodukte hinzugefügt. Der hierfür notwendige Anteil wurde bereits in den Modellrechnungen berücksichtigt. Die ausreichende Sulfatträger-entwässerung konnte

durch die separate Trocknung (in einem Trockenschank bei 120°C, 24 Std.) sichergestellt werden.

Die aus den Klinkermehlen und Sulfatträgern gemischten CEM I-Zemente wurden in Mörteluntersuchungen auf ihren Wasseranspruch und die Festigkeitsentwicklung nach 2, 7 und 28 Tagen geprüft (**Tabelle A-13-21, Tabelle A-13-24**). Darüber hinaus wurde an ausgewählten Proben die Hydratationswärmeentwicklung nach 2 Tagen bestimmt.

8.2.1 Festigkeitsentwicklung

Bei Erhöhung der spezifischen Oberfläche steigt im Allgemeinen die Zement-Druckfestigkeit an. Generell gilt dieser Zusammenhang auch für die Zemente, die durch separate Feinstmahlung hergestellt wurden (siehe auch **Bild 8-3**). Die direkte Gegenüberstellung zeigt, dass die aus Klinker 1 hergestellten Zemente aufgrund seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung bereits mit sehr niedriger Feinheit sehr hohe Festigkeiten an allen Terminen erzeugen. Zemente, hergestellt aus Klinker 2, benötigen aufgrund der niedrigen Reaktivität wesentlich höhere Feinheiten, wodurch die maximal erreichbare Festigkeit in allen Terminen deutlich eingeschränkt ist. Gründe hierfür können neben den unterschiedlichen Reaktivitäten auch die deutlich unterschiedlichen Kaliumoxid-Gehalte der Klinker sein [Loc 2000].

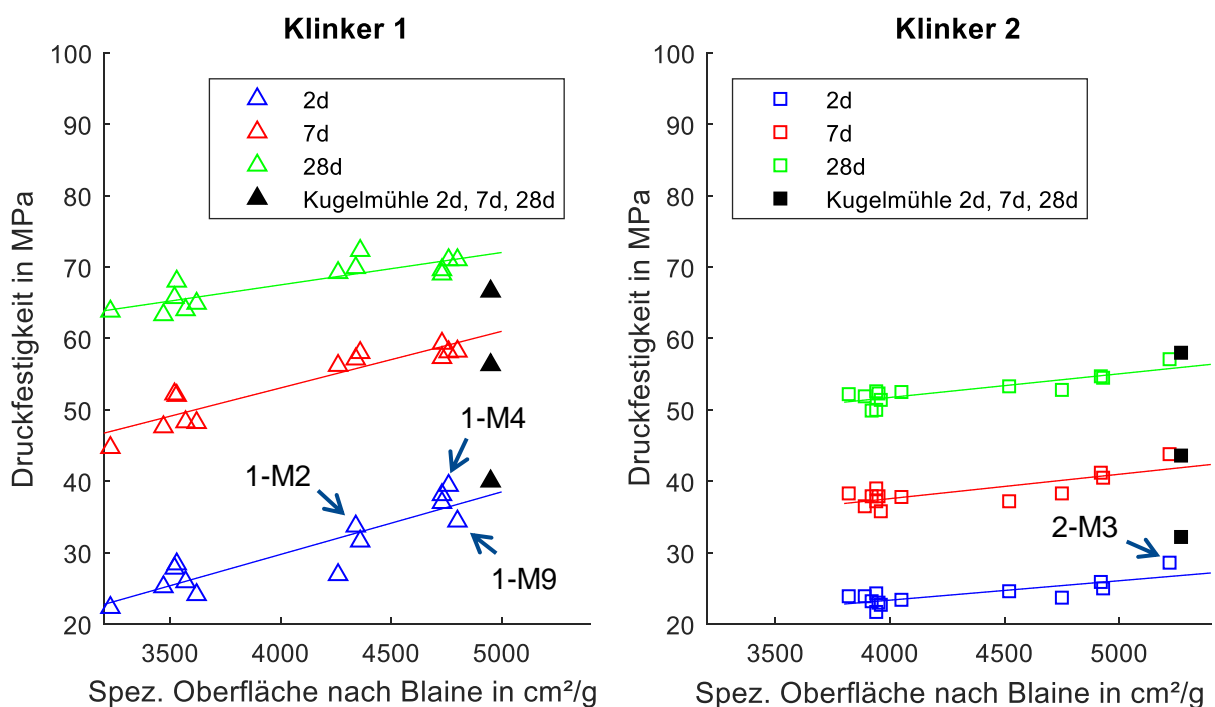


Bild 8-3 Einfluss der spezifischen Oberfläche nach Blaine auf die Druckfestigkeit

Bild 8-3 zeigt auch, dass bei nahezu gleicher spezifischer Oberfläche nach Blaine deutlich unterschiedliche Festigkeiten erzielt werden können. Mischung 1-M4 erreicht be-

reits mit wesentlich niedrigerer spezifischer Oberfläche die Festigkeitswerte der Referenzmahlung von Klinker 1. Die spezifische Oberfläche der Mischungen 1-M2 und 1-M9 unterscheiden sich um $460 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine und erzielen dennoch vergleichbare Festigkeiten.

Bild 8-4 zeigt die Frühfestigkeiten nach 2 Tagen (2d) von Klinker 1 in Abhängigkeit der Korngrößenverteilungen. Die Frühfestigkeit steigt im Allgemeinen, wenn der Lageparameter sinkt. Werden die Korngrößenverteilungen direkt verglichen, weisen die Dichteverteilungen (q_3) jedoch Unterschiede auf. Obwohl der Feinanteil und Lageparameter von 1-M13 ähnlich sind wie bei 1-M6 und 1-M7, zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Frühfestigkeit. Die Korngrößenverteilungen von 1-M6 und 1-M7 enthalten weniger Grobmaterial, wodurch die Frühfestigkeit in den Mörtelversuchen steigt. Ähnliches zeigt auch der Vergleich der Korngrößenverteilungen von 1-M3 und der Referenz.

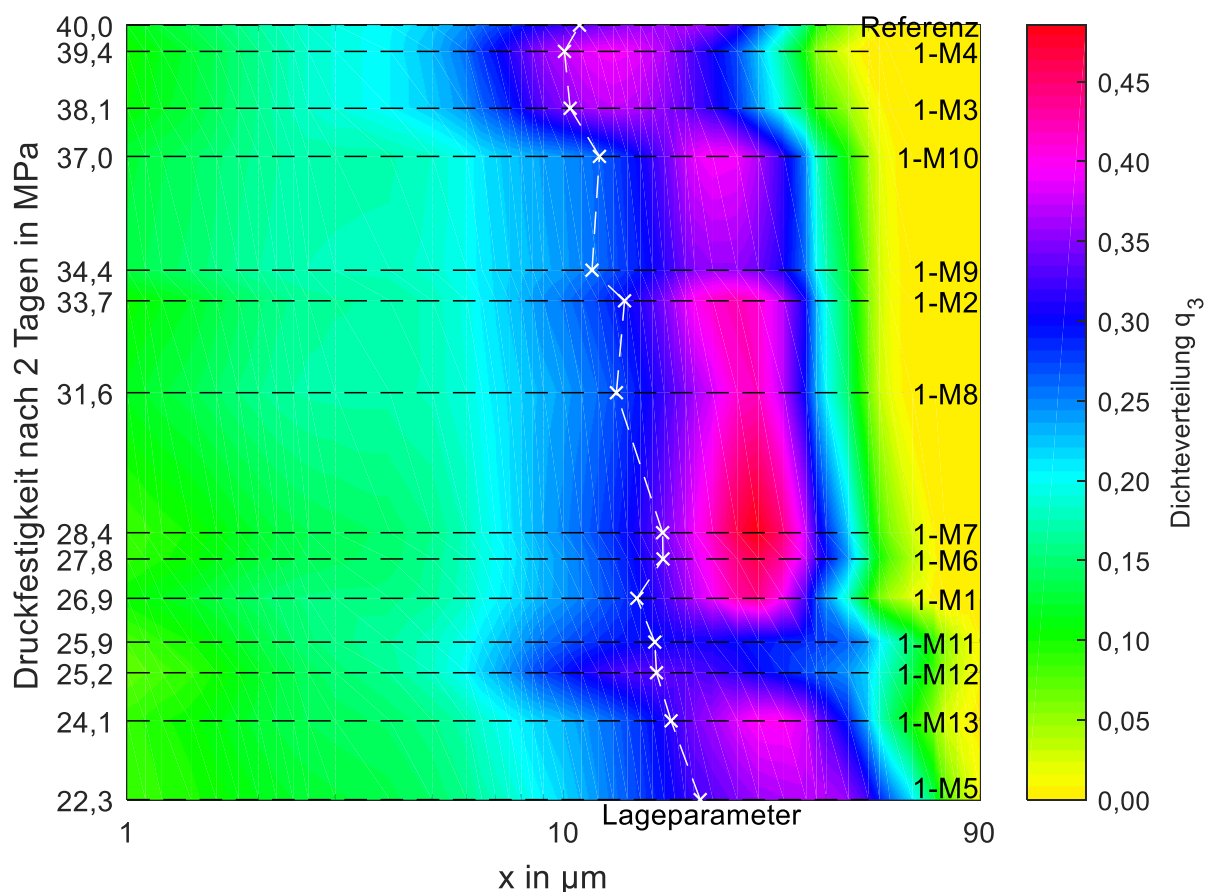


Bild 8-4 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Frühfestigkeit (Klinker 1)

Der Lageparameter der Korngrößenverteilungen der Mischungen 2-M2, 2-M4, 2-M8 und 2-M9 deutet darauf hin, dass der Lageparameter einen starken Einfluss auf die

Frühfestigkeit hat (**Bild 8-5**). Es zeigt sich jedoch auch eine Verbreiterung der Korngrößenverteilung gemessen am Steigungsmaß.

Die Frühfestigkeiten von 2-M3 und der Referenz-Korngrößenverteilung unterscheiden sich trotz ähnlicher spezifischer Oberfläche und gleichem Lageparameter deutlich. Die Betrachtung des gesamten Verlaufs des dargestellten Diagramms zeigt den wesentlich höheren Feinstanteil der Referenz-Korngrößenverteilung.

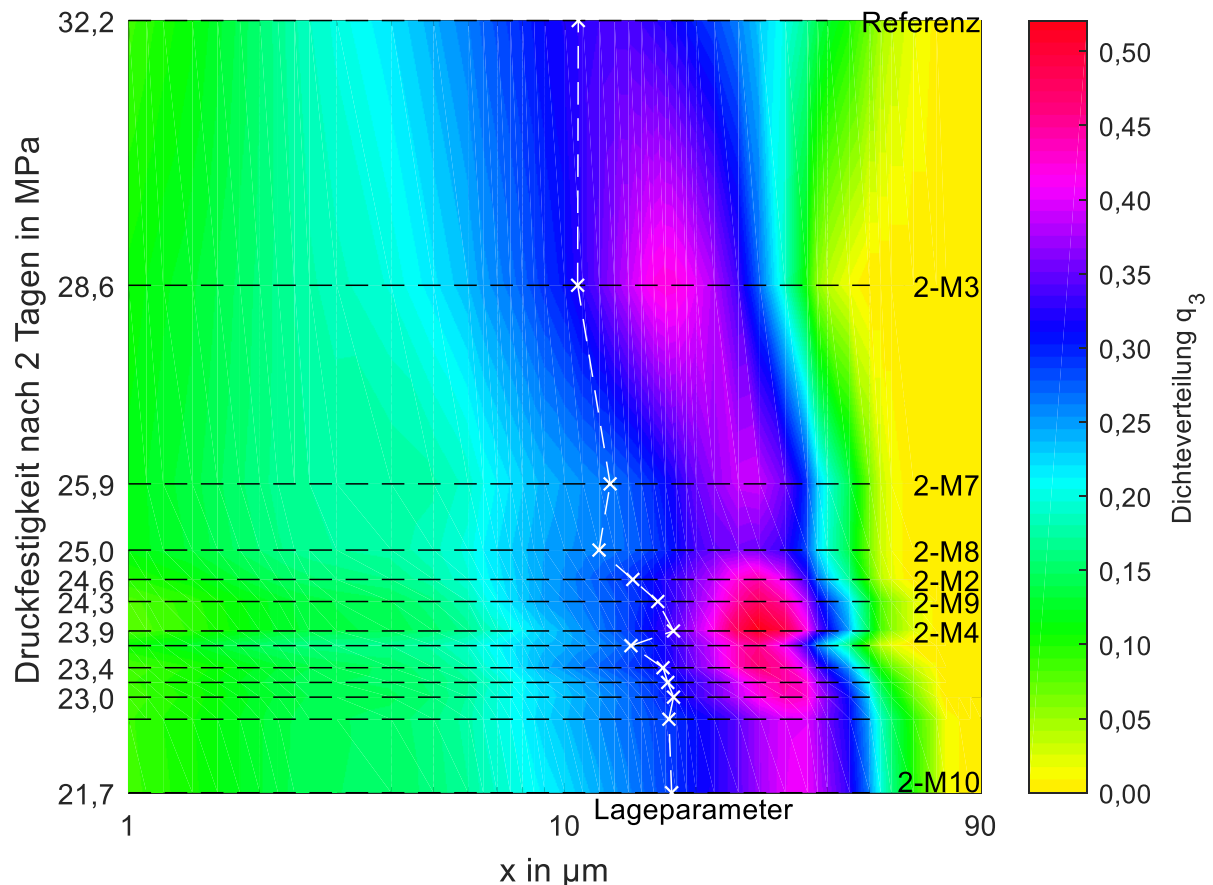


Bild 8-5 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Frühfestigkeit (Klinker 2)

Durch die Betrachtung wird deutlich wie wichtig die Bewertung des gesamten Partikelkollektivs ist. Der Versuch mit Hilfe der RRSB-Parameter oder der spezifischen Oberfläche nach Blaine Rückschlüsse auf die Frühfestigkeit zu ziehen ist schwierig, obwohl sich Trends abzeichnen können. Die einzelnen Parameter können jedoch nur die Korngrößenverteilung zusammenfassen, diese aber nicht im Detail beschreiben.

Für betriebliche Untersuchungen reichen die gewählten Verfahren und die beschriebenen Zusammenhänge aus. Werden weitere Untersuchungen, wie die Optimierung von Zementen durch Anpassung der Korngrößenverteilungen, nötig, muss das gesamte Partikelkollektiv betrachtet werden.

8.2.2 Wasseranspruch

Der Wasseranspruch zum Erreichen der Normsteife ist ein wichtiger Parameter für die Qualität des Zements. Für die hergestellten Mischungen wurde der Wasseranspruch nach DIN EN 196-3 bestimmt (**Tabelle A-13-21** und **Tabelle A-13-24**). Im ähnlichen Feinheitsbereich (Spannweite hier etwa 400 cm²/g nach Blaine) korreliert das Steigungsmaß der RRSB-Funktion hinreichend gut mit dem Wasseranspruch (**Bild 8-6**). Breitere Korngrößenverteilungen, als durch einstufige Mahlprozesse herstellbar, können gut durch die Mischungsrechnung und die Mischung der Zwischenprodukte erzeugt werden.

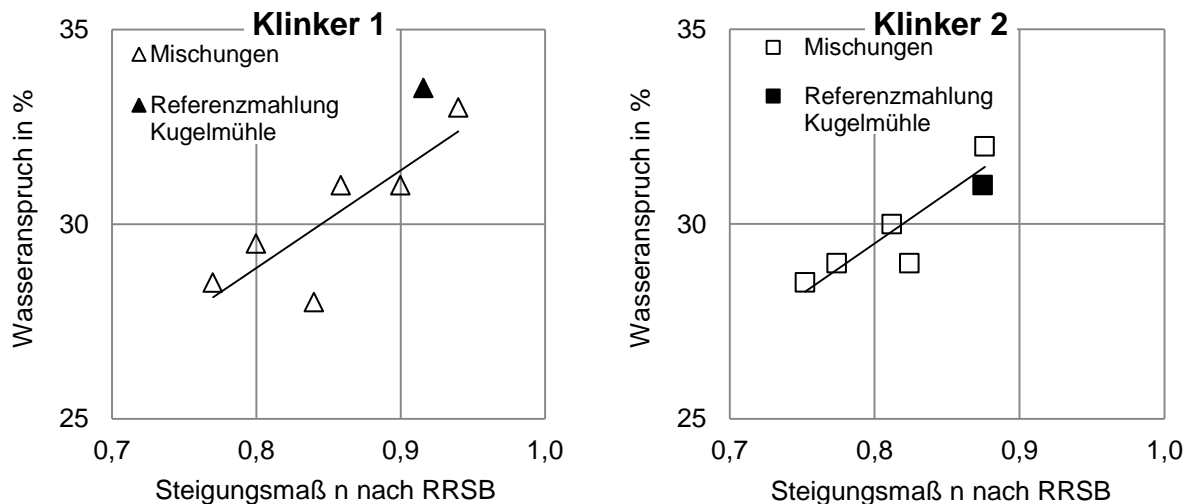


Bild 8-6 Wasseranspruch und Steigungsmaß der Referenzmahlung und der dazugehörigen Mischungen

Bild 8-7 zeigt den Einfluss des Lageparameters auf den Wasseranspruch. Bei beiden Klinkern steigt der Wasserbedarf mit zunehmender Feinheit. Besonders für die Mischungen und die Probe aus der Kugelmühle gemahlen aus Klinker 2 zeigt sich ein linearer Zusammenhang. Der Wasseranspruch der Proben aus Klinker 1 schwankt dagegen stärker. Die Mehle aus der Vertikal-Wälzmühle weisen bei ähnlicher Feinheit deutlich höhere Wasseransprüche auf als die Proben aus der Kugelmühle und die Mischungen. Grund hierfür ist die enge Korngrößenverteilung der Mehle aus der Vertikal-Wälzmühle.

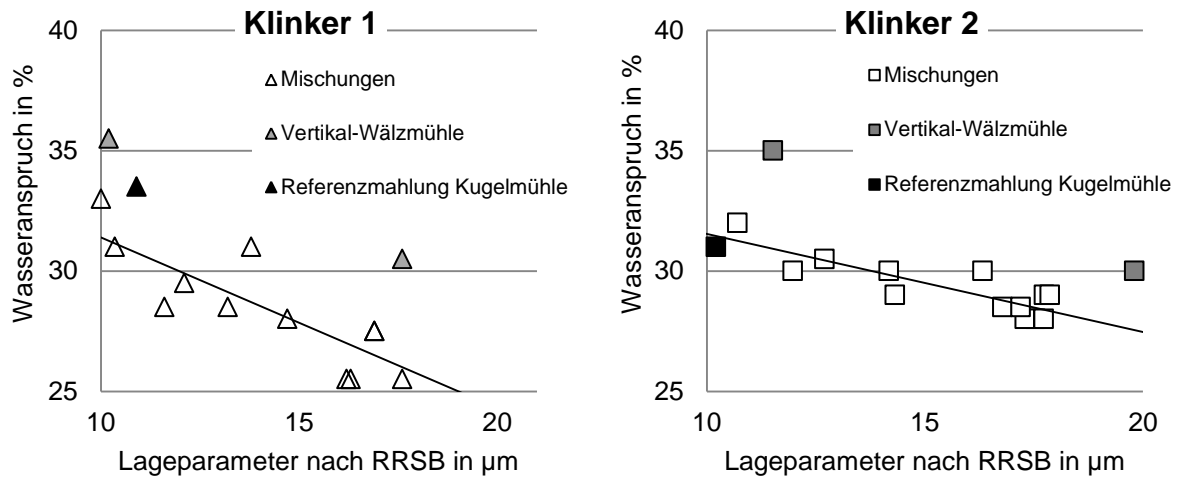


Bild 8-7 Wasseranspruch und Lageparameter der Referenzmahlung und der Mischungen

Die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung eignet sich nicht, um Rückschlüsse auf den Wasseranspruch zu ziehen. Hierfür sollte in einem ähnlichen Feinheitsbereich das Steigungsmaß nach RRSB verwendet werden (**Bild 8-6**). Es zeigt sich jedoch, dass (bis auf in einem Fall) durch die Mischungsrechnung breitere Korngrößenverteilungen berechnet wurden als durch die Referenzmahlung vorgegeben. Dies führte in diesen Fällen zu einer signifikanten Reduktion des Wasseranspruchs, was vorteilhaft für die Verarbeitung der hergestellten Zemente sein kann.

8.2.3 Hydratationswärmeentwicklung

"Die Temperaturerhöhung in Folge der frei werdenden Hydratationswärme und die anschließende Abkühlung rufen im Beton mechanische Spannungen hervor, wenn die Temperaturverformung behindert wird. Infolge dessen können sich durchgehende Risse bilden" [Loc 2000]. Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Klinkers beeinflusst darüber hinaus die Geschwindigkeit und den Verlauf der Wärmefreisetzung. Auch zeigt der Klinker-Zementfaktor einen Einfluss. Eine höhere Feinheit des Zements beschleunigt die Entwicklung der Hydratationswärme. [VDZ 2008]

Um den Einfluss der separaten Feinstmahlung und einer höheren Beanspruchungsintensität durch die Rührwerkskugelmühle zu untersuchen, wurde die Hydratationswärmeentwicklung der Mischungen und der Referenzmahlung von Klinker 1 in einem kontinuierlichen Verfahren (TAM Air) ermittelt. Bekannt ist der bereits erwähnte Zusammenhang zwischen Mahlfeinheit und Hydratationswärmeentwicklung (siehe auch **Bild 8-8** links). Die höhere Beanspruchungsintensität durch die Rührwerkskugelmühle beeinflusst diesen Zusammenhang nicht. Die Mischungen überschreiten in keinem Fall die Hydratationswärme des Mehls aus der Referenzmahlung oder, bei gleicher

Mahlfeinheit, die Hydratationswärme der Mehle aus der Vertikal-Wälzmühle (VRM). Ein negativer Einfluss des Verfahrens auf die Hydratationswärmeentwicklung ist daher nicht festzustellen. **Bild 8-8** (rechts) zeigt den Zusammenhang zwischen der freigesetzten Hydratationswärme nach 2 Tagen und der dazugehörigen Frühfestigkeit. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Die Probe der Referenzmahlung in der Kugelmühle weist neben der höchsten Hydratationswärme auch die höchste Druckfestigkeit nach 2 Tagen auf.

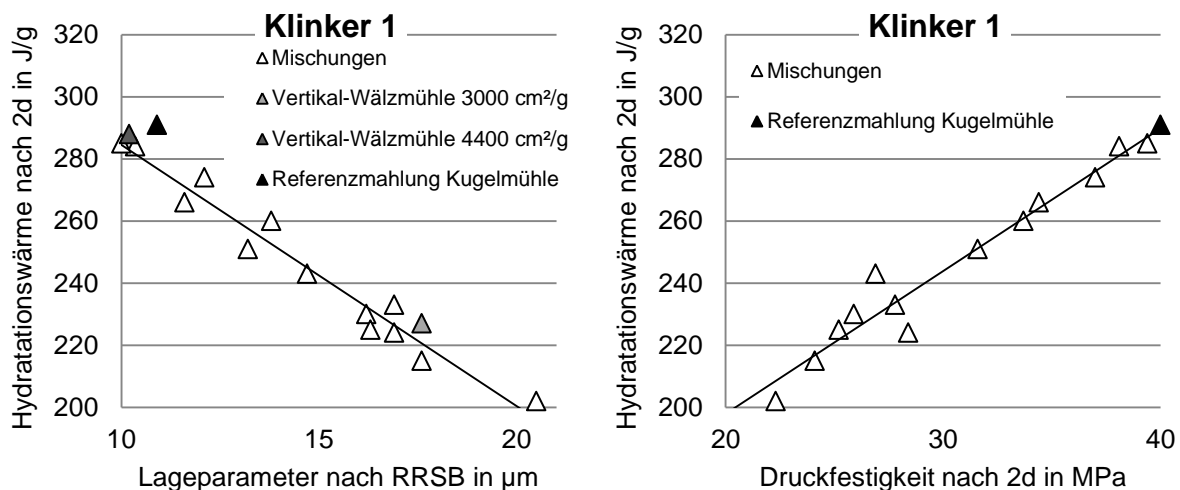


Bild 8-8 Kumulierte Hydratationswärme nach 2 Tagen für Klinker 1. Links Vergleich zum Lageparameter. Rechts: Vergleich zur Druckfestigkeit nach 2 Tagen

8.3 Einfluss der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung auf die Zement Eigenschaften

Mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Modells wird die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung (siehe auch Kapitel 7.2) zur Bewertung der Güte der Mischung berechnet. In vielen Fällen ist es weder sinnvoll noch möglich, eine exakte Kopie der Referenz-Korngrößenverteilung herzustellen. Da die Abweichung zu diesem Zeitpunkt noch als abstrakter Parameter zu verstehen ist, muss eine Korrelation mit den Zement Eigenschaften gefunden werden. Die Abweichungen wurden daher den Druckfestigkeiten gegenübergestellt (siehe auch **Bild 8-9**). Die Abweichung der Mischungen aus Klinker 1 hat nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeit nach 28 Tagen. Aufgrund der hohen Reaktivität von Klinker 1 werden sehr hohe Frühfestigkeiten bereits bei niedrigen Feinheiten erreicht. Die Frühfestigkeit ist im Beispiel stark von der Abweichung abhängig.

Als Maximum für die Abweichung wurde ein Wert von 0,02 für weitere Versuche festgesetzt. Bei diesem Wert zeigten die untersuchten Zemente aus Klinker 1 keine signifikanten niedrigeren Festigkeiten im Vergleich zu den Referenzproben. Die aus den Mehlen von Klinker 2 gemischten Zemente wiesen zu hohe Abweichungen auf, um der

Referenz-Korngrößenverteilung ausreichend gut zu entsprechen. Dies wirkt sich auch auf die Druckfestigkeiten aus. Besonders die Frühfestigkeit ist davon betroffen. Um bessere Ergebnisse zu erzielen ist die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung zu reduzieren, wenn weniger reaktive Klinker verwendet werden.

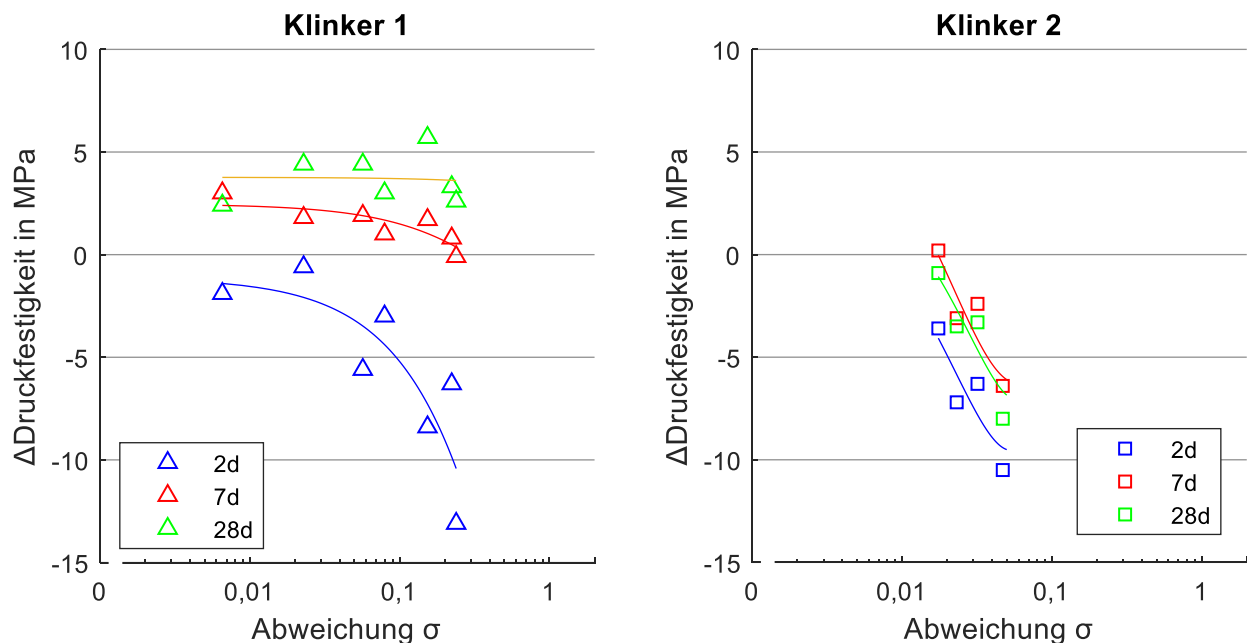


Bild 8-9 Relative Festigkeitsentwicklung zu der Referenzmahlung in Abhängigkeit der Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung

Die Zementnorm (DIN EN 197-1) gibt für unterschiedliche Festigkeitsklassen Bereiche vor, in denen die Festigkeiten der Zemente nach 2 oder 7 und 28 Tagen liegen müssen (**Tabelle 8-3**). Zum Ausgleich prozessbedingter Schwankungen werden Zemente meist feiner gemahlen als unbedingt notwendig ist.

Tabelle 8-3 Zementfestigkeitsklassen nach DIN EN 197-1

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit in N/mm ²		
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit
	2 Tage	7 Tage	
32,5 N	-	≥ 16	32,5 – 52,5
32,5 R	≥ 10	-	
42,5 N	≥ 10	-	42,5 – 62,5
42,5 R	≥ 20	-	
52,5 N	≥ 20	-	$\geq 52,5$
52,5 R	≥ 30	-	

Bild 8-10 zeigt, dass mit Klinker 1 hohe Normdruckfestigkeiten, auch mit relativ hohen Abweichungen zum Referenz-Zement aus der Kugelmühle (im Bild Abweichung 0),

erreicht werden können. In einigen Fällen ist die Ursache in der Berechnung der Abweichung zu suchen. Die Abweichung enthält keine Information, ob die verglichene Korngrößenverteilung gröber oder feiner ist.

Die Mehle beider Klinker aus der Kugelmühle sind nach DIN EN 197-1 der Festigkeitsklasse 52,5 R zuzuordnen. Die Referenzmahlung von Klinker 2 erreicht diese Festigkeitsklasse jedoch nur sehr knapp. Besonders mit Blick auf mögliche Prozessschwankungen sollte der Referenz-Zement feiner aufgemahlen werden.

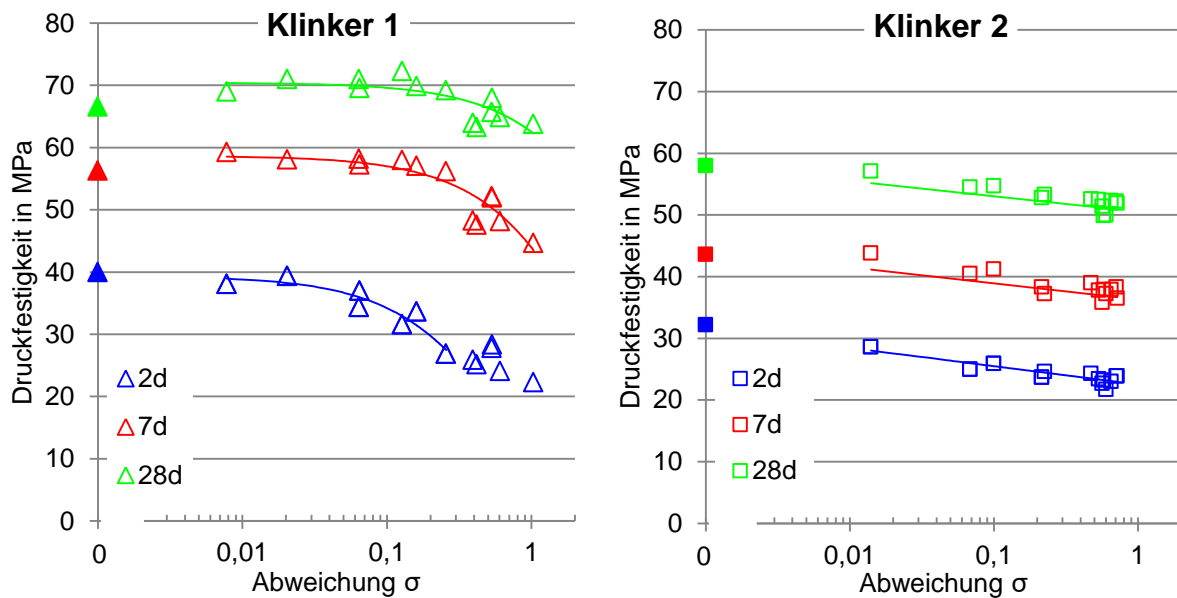


Bild 8-10 Festigkeitsentwicklung bezogen auf die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung zur Referenzmahlung

9 Bewertung des Energiebedarfs durch Mahlversuche in Industrieumgebung

9.1 Einfluss der Zwischenprodukte auf den spezifischen Energiebedarf

Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden stark von den verfügbaren Korngrößenverteilungen beeinflusst. Dies hat bereits die Variation der Randbedingungen in Kapitel 8.3 gezeigt. Um den Einfluss der verschiedenen Zwischenprodukte aus dem 1. und 2. Mahlschritt auf den spezifischen Energiebedarf zu untersuchen wurden 3 Modellszenarien zusammengestellt (**Tabelle 9-1**). Immer verwendet werden die Zwischenprodukte 3-A1 und 3-A3 aus dem 1. Mahlschritt, die verfügbaren Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt werden variiert:

- In Modellszenario 1 werden alle Zwischenprodukte genutzt, die aus 3-A1 und 3-A3 im 2. Mahlschritt feinstgemahlen wurden.
- In Modellszenario 2 werden nur die Zwischenprodukte aus der Durchlaufmahlung im 2. Mahlschritt genutzt.
- In Modellszenario 3 werden nur Zwischenprodukte genutzt, die aus 3-A3 im 2. Mahlschritt durch Durchlaufbetrieb gemahlen wurden.

Tabelle 9-1 Beschreibung der Modellszenarien

		Modellszenarien		
		1	2	3
Zwischenprodukte 1. Mahlschritt		3-A1, 3-A3	3-A1, 3-A3	3-A1, 3-A3
Zwischenprodukte 2. Mahlschritt	D	Alle	Alle	Nur aus 3-A3
	U	Alle	-	-

D = Durchlaufmahlung, U = Kreislaufmahlung

Einzelne Zwischenprodukte (siehe auch Kapitel 6.3.2, **Bild 6-14**) wurden nicht bei den Modellrechnungen genutzt, da die Herstellung in der Rührwerkskugelmühle nicht energieeffizient möglich war. **Tabelle 8-1** zeigt die verwendeten Randbedingungen für die Modellrechnungen.

Bild 9-1 zeigt, dass die Abweichungen der Mischungen der Korngrößenverteilung bei der Berechnung von Modellszenario 1 sehr gering sind. Dies liegt zum einen an der großen Anzahl der Zwischenprodukte und zum anderen an der großen Spannbreite der Korngrößenverteilungen.

Durch die sehr engen¹ und groben bzw. supergrogen¹ Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte aus der Argo-Mühle mussten sehr hohe Materialanteile aus dem 2. Mahlschritt verwendet werden. Um zum Beispiel den CEM I 52,5 R nachzubilden, wurden immer mehr als 70 % Materialanteil aus dem 2. Mahlschritt verwendet. Für die Nachbildung des CEM I 42,5 N waren die Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt besser geeignet. Hier liegen die Materialanteile aus dem 2. Mahlschritt zwischen 10 und 50 %. Die meist feinen¹ und superfeinen¹ Zwischenprodukte aus der Kreislaufmahlung wirken sich positiv auf die Abweichung aus. Dies liegt auch an dem niedrigen Feinstanteil der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt.

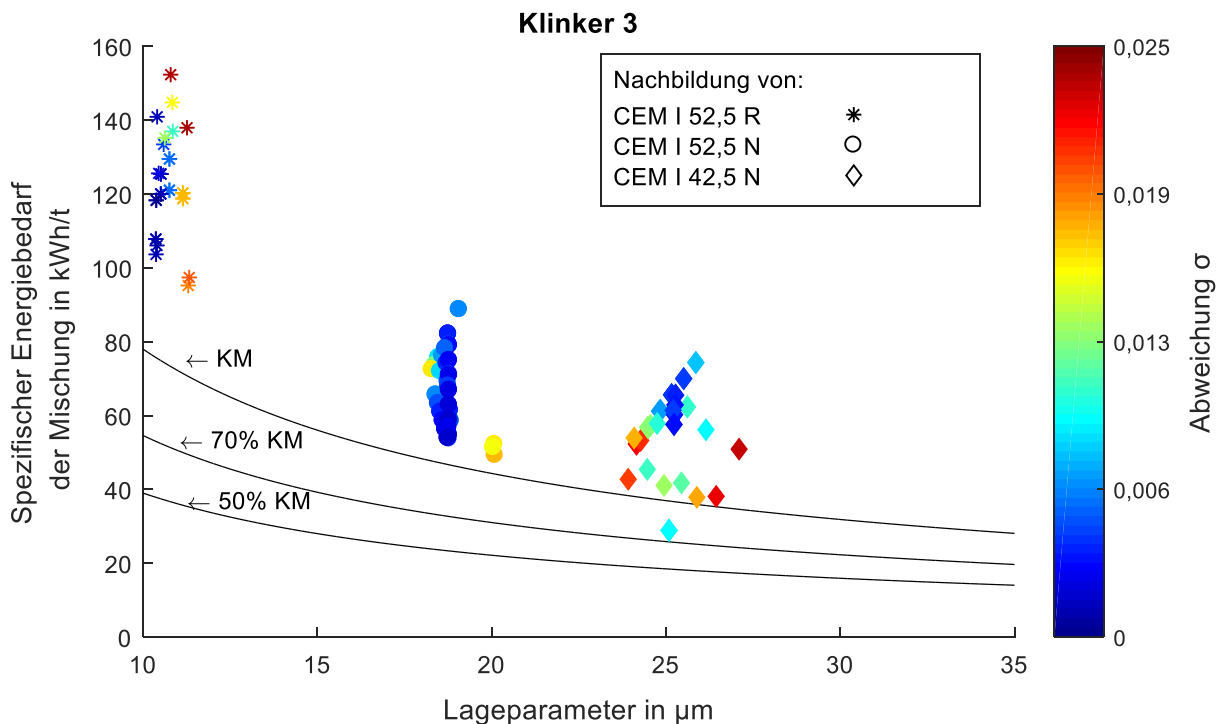


Bild 9-1 Ergebnisse von Modellszenario 1

Bei der Berechnung von Modellszenario 2 wurden nur im Durchlauf gemahlene Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt genutzt. Der spezifische Energiebedarf konnte wesentlich reduziert werden (**Bild 9-2**). Für die Nachbildung der Zemente CEM I 42,5 N und CEM I 52,5 N konnte der spezifische Energiebedarf auf etwa 70 % des spezifischen Energiebedarfs der Kugelmühle reduziert werden. Aufgrund der groben Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt konnte der CEM I 52,5 R nicht mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Um diesen besser abbilden zu können, muss die Mahlfeinheit der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt erhöht werden.

¹ Definition der Feinheitsbereiche siehe Anhang Kapitel F.

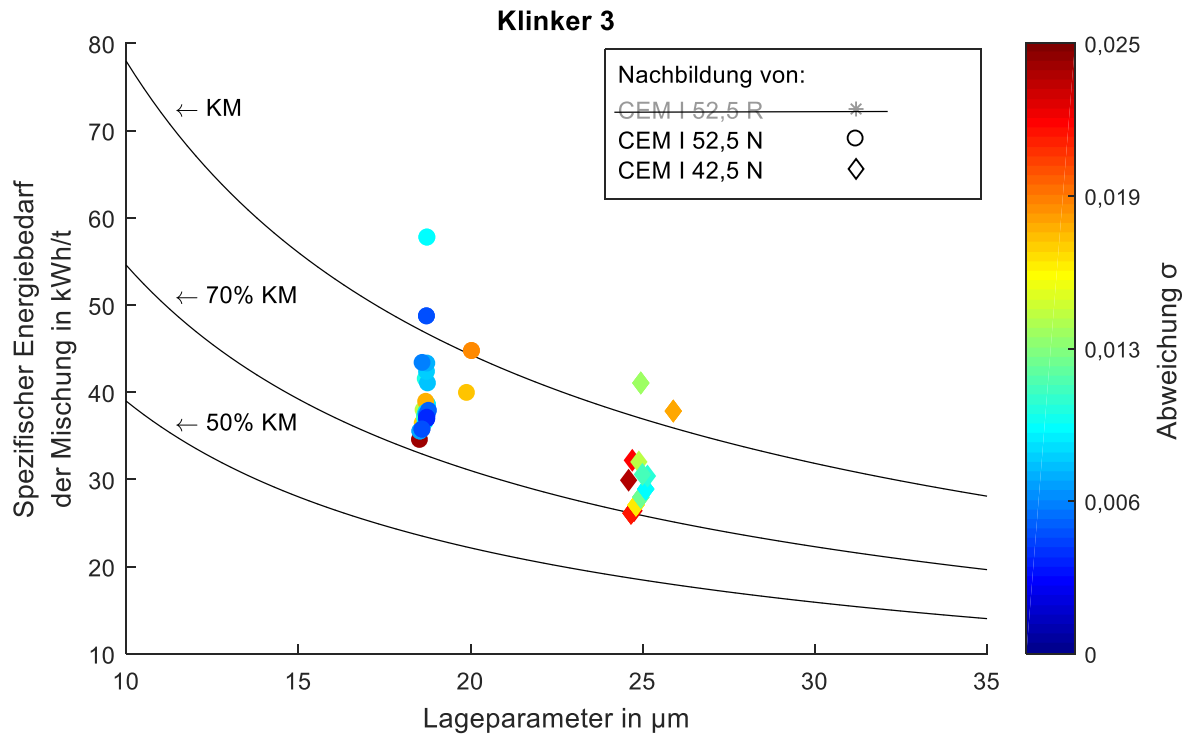


Bild 9-2 Ergebnisse von Modellszenario 2 (CEM I 52,5 R nicht möglich)

Eine weitere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs war durch die Eingrenzung der zur Verfügung stehenden Zwischenprodukte in Modellszenario 3 nicht möglich (**Bild B 13-10**). Teilweise konnten die spezifischen Energiebedarfe einzelner Mischungen reduziert werden, gleichzeitig wurden jedoch höhere Abweichungen berechnet. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass das durch Modellszenario 3 beschriebene Vorgehen in anderen Versuchen dennoch zu untersuchen ist.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen teils unnötig niedrige Abweichungen der Korngrößenverteilung der Mischung. Um den spezifischen Energiebedarf weiter zu verbessern, wurde die Randbedingung zur Vorgabe des Anteil der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt ($RB_{\omega, ZP1}$) durch einen Optimierungsvorgang variiert, mit dem Ziel die Abweichung bis zum definierten Grenzwert von 0,02 (Kapitel 8.3) zu erhöhen.

Bild 9-3, **Bild B 13-11** und **Bild B 13-12** zeigen, dass durch die Erhöhung der Abweichung der spezifische Energiebedarf reduziert werden kann. Dies zeigt auch der Vergleich zur Berechnung der minimal möglichen Abweichungen (**Bild 9-2**). Für die betrachteten Szenarien wurden Verbesserungen des spezifischen Energiebedarfs von bis zu 50 % im Vergleich zur Kugelmühle erreicht. **Tabelle 9-2** zeigt die Beschreibung und Bewertung der Modellrechnungen

Zusammenfassend war die Reduktion des spezifischen Energiebedarfs durch Modellszenario 2 am höchsten (**Tabelle 9-2**). Obwohl die Mahlfeinheit der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt sehr niedrig war, konnte der spezifische Energiebedarf

zur Nachbildung der Zemente CEM I 42,5 N und CEM I 52,5 N im Vergleich zur Kugelmühle stark reduziert werden.

Tabelle 9-2 Bewertung der Modellszenarien

		Modellszenarien		
		1	2	3
Zwischenprodukte 1. Mahlschritt		3-A1, 3-A3	3-A1, 3-A3	3-A1, 3-A3
Zwischenprodukte 2. Mahlschritt	D	Alle	Alle	Nur aus 3-A3
	U	Alle	-	-
Ziel der Modellrechnungen: Minimale Abweichung				
Bewertung spez. Energiebedarf		--	+	+
Bewertung der Abweichung		+++	++	+
Ziel der Modellrechnungen: Maximierung der Abweichung auf 0,02				
Bewertung spez. Energiebedarf		O	++	++
Bewertung der Abweichung		O	O	O

D = Durchlaufmahlung, U = Kreislaufmahlung

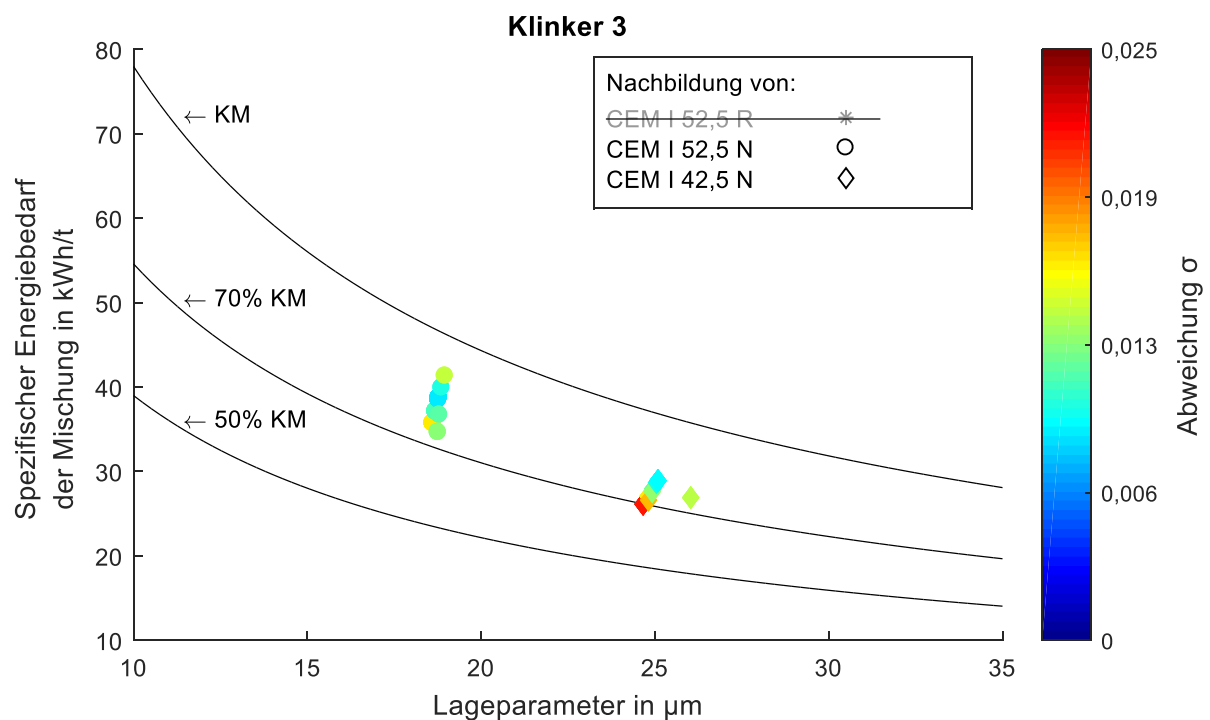


Bild 9-3 Ergebnisse von Modellszenario 2 mit maximierter Abweichung (CEM I 52,5 R nicht möglich)

9.2 Festigkeitsentwicklung

Aus den Modellergebnissen wurden drei Mischungen ausgewählt, zu Zementen gemischt und deren Druckfestigkeiten (**Tabelle 9-4**) bestimmt. Die Zemente CEM I 42,5 N und CEM I 52,5 N wurden aus den gleichen Mischungskomponenten aber mit unterschiedlichen Anteilen hergestellt (**Tabelle A-13-28**). Die Verwendung der gleichen Zwischenprodukte für unterschiedliche Referenz-Zemente wirkt sich positiv auf die Anwendbarkeit des Verfahrens in der betrieblichen Praxis aus.

Tabelle 9-3 Zement hergestellt durch die separate Feinstmahlung

	CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N
Zusammensetzung der Mischung		
3-A1	53,9 %	10,5 %
3-A3	17,2 %	50,0 %
3-D3	28,9 %	39,5 %
Kenndaten der Mischung		
Abweichung	0,0227	0,0090
Spezifischer Energiebedarf (Modellrechnung)	26,9 kWh/t	36,3 kWh/t
Spezifische Oberfläche nach Blaine (gemessen)	2860 cm ² /g	3360 cm ² /g

Die nachgebildeten Zemente CEM I 42,5 N und CEM I 52,5 N konnten durch die separate Feinstmahlung mit einem geringeren spezifischen Energiebedarf hergestellt werden als durch die Werkskugelmühle (**Bild 9-4**). Trotz des zur Produktion nötigen hohen spezifischen Energiebedarfs von 108 kWh/t wurde auch ein CEM I 52,5 R nachgebildet (Zusammensetzung der Mischung siehe **Tabelle A-13-28** und **Bild B 13-9**).

Der spezifische Energiebedarf kann durch die Verwendung feinerer Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt weiter verbessert werden. Der Sichterkreislauf der Rührwerkskugelmühle hatte einen immensen Anteil am spezifischen Energiebedarf. Bei entsprechender Auslegung und Optimierung der Feinstmahlanlage auf den Anwendungsfall und besonders auf das Aufgabematerial sind bessere Ergebnisse durch Kreislaufmahlungen zu erwarten, als hier dargestellt werden konnte.

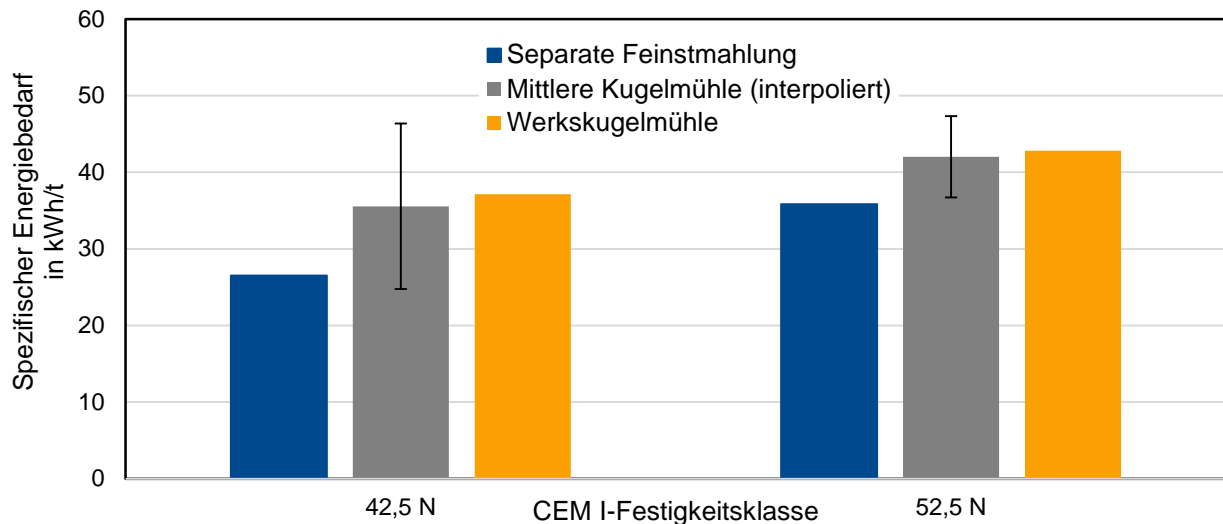


Bild 9-4 Spezifischer Energiebedarf der Zemente hergestellt durch die separate Feinstmahlung

Die gemischten Zemente wurden ohne Mahlhilfsmittel hergestellt. Feine Zemente werden fast ausschließlich mit Mahlhilfsmitteln hergestellt. Die Zemente aus der Werkskugelmühle wurden mit Mahlhilfsmitteln gemahlen. Es ist zu erwarten, dass der spezifische Energiebedarf nochmals reduziert werden kann, wenn im 2. Mahlschritt Mahlhilfsmittel verwendet werden. Auch die Verwendung von Mahlhilfsmitteln im 1. Mahlschritt könnte sich positiv auswirken, besonders wenn, wie in diesen Untersuchungen, die Mahlanlage durch den verwendeten Sieb limitiert ist.

Für die Mischungen von Klinker 3 wurden die Festigkeiten des CEM I 42,5 N und des CEM I 52,5 N nach 2 und 28 Tagen bestimmt. Die Unterschiede zwischen den 2-Tage-Druckfestigkeiten der hergestellten Mischungen und den Werkszementen sind nicht signifikant (siehe auch **Tabelle 9-4**). Dies ist auch auf die gute Übereinstimmung im Feinstbereich zurückzuführen (**Bild B 13-8**). Für den CEM I 52,5 N befindet sich der Unterschied im Bereich der Standardabweichung ($\sigma = 2,2 \text{ MPa}$) des Zements aus der separaten Feinstmahlung. Die Druckfestigkeiten des CEM I 42,5 N sind nach 28 Tagen jedoch deutlich geringer als die der Werkszemente. Dies ist auf die vergleichsweise hohe Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung von 0,0227 und eine Unterrepräsentation des Grobbereichs (**Bild B 13-8** oben) zurückzuführen. Die hohe Abweichung wurde gewählt, um beide Zemente aus den gleichen Mischungskomponenten herstellen zu können.

Tabelle 9-4 Druckfestigkeiten der Zemente aus den skalierungsfähigen Mahlversuchen

	Druckfestigkeit nach 2 Tagen in N/mm^2		Druckfestigkeit nach 28 Tagen in N/mm^2	
	Separate Feinstmahlung	Werkszement	Separate Feinstmahlung	Werkszement
CEM I 42,5 N	19,5	18,5	49,2	56,0
CEM I 52,5 N	26,2	25,8	60,5	62,3

10 Praktische Umsetzung der separaten Feinstmahlung

Um die separate Feinstmahlung im Zementwerk anwenden zu können, ist die Betrachtung weiterer Rahmenbedingungen zur praktischen Umsetzung notwendig. In dieser Arbeit steht die Feinstmahlung in einer Rührwerkskugelmühle im Vordergrund. Prinzipiell muss jedoch keine Rührwerkskugelmühle verwendet werden. Die Auswahl geeigneter Mahltechnik hängt stark von den Zielfeinheiten der zu produzierenden Zemente ab.

Im 2. Mahlschritt kann auch eine geeignete Kugelmühle genutzt werden, wenn die zu erzeugenden Zwischenprodukte nicht besonders fein sein müssen.

Im Gegensatz zu üblichen mehrstufigen Anlagenschaltungen mit Gutbett-Walzenmühlen, wie z.B. der Teil-Fertigmahlung, wird auf der nachgeschalteten Feinstmühle nur ein Teilstrom gemahlen. Verwendete Anlagen müssen daher in ihrer Dimensionierung angepasst sein.

Die in dieser Arbeit vorgestellte separate Feinstmahlung ist besonders gut in Zementwerke integrierbar, wenn die Zemente durch getrenntes Mahlen und Mischen hergestellt werden. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob bestehende Mahlanlagen (wie Gutbett-Walzenmühlen, Vertikal-Wälzmühlen, Kugelmühlen oder Sichter) genutzt werden können.

Zur sukzessiven Implementierung der separaten Feinstmahlung in bestehende Werksstrukturen wird folgender 4-Punkte-Plan vorgeschlagen:

1. Identifikation geeigneter Zemente

Grobe Zemente (z.B. CEM I 32.5) können unter Umständen bereits in Hochdruckzerkleinerungsanlagen hergestellt werden, wodurch der Einsatz von mehrstufige Zerkleinerungsverfahren nicht sinnvoll wäre. Die groben Zemente können auch als Aufgabematerial für den 2. Mahlschritt verwendet werden.

2. Bewertung verfügbarer Mahlanlagen

- Gutbett-Walzenmühlen oder Vertikal-Wälzmühlen eignen sich grundsätzlich für die Mahlung im 1. Mahlschritt. Der $D_{90\%}$ -Wert des Feinguts sollte etwa dem Maximalkorn des nachzubildenden Produktes entsprechen.
- Mühlen die im 2. Mahlschritt feine Materialien produzieren könnten (wie Kugelmühlen) sollten bewertet werden.
- Optimierungspotentiale vorhandener Anlagen zur Steigerung der Energieeffizienz und der Zerkleinerung müssen erhoben werden. Hierzu zählen besonders Sichter und die Gattierung von Kugelmühlen.

3. Bewertung des Potentials der separaten Feinstmahlung

Das Potential der separaten Feinstmahlung zur Verbesserung des spezifischen Energiebedarfs oder der Zementeigenschaften kann mit Hilfe von Modellrechnungen erhoben werden. Eine allgemeingültige Vorgehensweise dazu ist in dieser Arbeit beschrieben. Dennoch wird empfohlen, die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung für den individuell verfügbaren Klinker und die speziellen Bedingungen im Zementwerk zu bestätigen.

Für die Mischungen sollten nicht mehr als 2 Zwischenprodukte je Mahlschritt verwendet werden. Die einzelnen Referenzprodukte des Sortenportfolios sind zunächst in mehreren Berechnungen nachzubilden. Hieraus können die benötigten Zwischenprodukte bestimmt werden, um sämtliche Zemente zu mischen.

4. Auswahl von Mischungen aus den Modellrechnungen

Bei der Auswahl der Mischungen sind verschiedene Zielsetzungen möglich:

- Minimaler spezifischer Energiebedarf
Um alle verfügbaren Zementsorten herzustellen, können viele unterschiedliche Zwischenprodukte benötigt werden. Hoher organisatorischer Aufwand und gegebenenfalls hohen Investitionskosten in neue Silokapazitäten sind nötig. Es sollte erwogen werden, auf Kosten des spezifischen Energiebedarfs oder der Abweichung der Mischung die Anzahl der Zwischenprodukte zu reduzieren, um das Sortenportfolio einfacher herstellen zu können.
- Verbesserung der Zementeigenschaften
Zur Verbesserung der Zementeigenschaften können der Feinstbereich und der Rest der Korngrößenverteilung unabhängig voneinander eingestellt werden. Besonders die Frühfestigkeit von Kompositzementen kann wahrscheinlich von einer Erhöhung des Klinkeranteils im Feinstbereich profitieren. Dies ist jedoch in nachfolgenden Untersuchungen nachzuweisen.
- Bestmögliche Nachbildung einer Korngrößenverteilung (*Forschung und Entwicklung*)
Die exakte Nachbildung von Korngrößenverteilungen ist für den betrieblichen Alltag zwar denkbar, aber nicht immer zielführend. Dieser Ansatz kann jedoch in der weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchung des Einflusses multimodaler Korngrößenverteilungen auf die Zementeigenschaften Anwendung finden.

11 Zusammenfassung

Die Nutzung besonders effizienter Mahlanlagen wie der Gutbett-Walzenmühle und der Vertikal-Wälzmühle zur Zement-Fertigmahlung wurde in Deutschland bisher nicht realisiert. Besonders feine Zemente mit breiten Korngrößenverteilungen können mit diesen Anlagen nicht effizient und betriebssicher hergestellt werden. Gutbett-Walzenmühlen werden jedoch häufig in mehrstufigen Verfahren eingesetzt. Hier wird das gesamte Material nachzerkleinert.

In der vorliegenden Arbeit wurde anhand von CEM I-Zementen untersucht, inwiefern die anteilige Nachmahlung von vorgemahlenen Mehlen aus Hochdruckzerkleinerungsanlagen und anschließende Mischung (kurz: separate Feinstmahlung) die Zementeigenschaften bekannter Zemente (z.B. aus einer Kugelmühle) nachbilden und gleichzeitig den spezifischen Energiebedarf reduzieren kann.

Zemente, die durch separate Feinstmahlung hergestellt werden, weisen bei gleicher Korngrößenverteilung die gleichen Zementeigenschaften auf wie Zemente aus der Kugelmühle. Die exakte Nachbildung von Korngrößenverteilungen ist jedoch nicht immer zweckmäßig. In praxisnahen Untersuchungen wurde anhand einer kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle und einer diskontinuierlich betriebenen Rührwerkskugelmühle bestätigt, dass zur exakten Nachbildung eine Vielzahl von Zwischenprodukten in die Mischung eingehen müssen. Hierdurch steigen der Aufwand bei der Produktion und die benötigte Silokapazität, ebenso wie der spezifische Energiebedarf. Empfohlen wird daher die Anzahl der Zwischenprodukte aus dem 1. und 2. Mahlschritt auf je maximal zwei zu reduzieren.

Um aus Zwischenprodukten unterschiedlicher Feinheit eine gewünschte Korngrößenverteilung herzustellen, besteht eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgeschlagen, um aus praktisch herstellbaren Zwischenprodukten eine Mischung herzustellen, die zum einen die Zementeigenschaften eines Vergleichsproduktes erreicht, aber zum anderen auch den spezifischen Energiebedarf im Vergleich zu dieser senken kann. Kern ist eine einfache Mischungsrechnung. Durch einen Minimierungsansatz kann die geringstmögliche Abweichung zu einer Referenz-Korngrößenverteilung bestimmt werden, indem die Anteile der Zwischenprodukte variiert werden. Durch Nutzung von Randbedingungen kann die Anzahl der verwendeten Zwischenprodukte oder die Verwendung von Kleinstmengen reguliert werden. Ein Minimal- oder Maximalanteil der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt kann vorgegeben werden, um diese Anteile direkt zu steuern und somit den spezifischen Energiebedarf beeinflussen zu können. Weitere Bestandteile (Sulfatträger, Nebenbestandteile) müssen bei der Bestimmung der Mischungsverhältnisse berücksichtigt werden.

Der Ausgleich geringer Abweichungen zwischen den Korngrößenverteilungen kann hohen Aufwand bei der Herstellung und Handhabung der Zwischenprodukte verursa-

chen, resultiert aber nur in geringen Änderungen der Zementeigenschaften. Als Maß wurde die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung von der des Referenzzements eingeführt. Ist diese kleiner 0,02 entspricht die Festigkeitsentwicklung der gemischten Zemente der des Referenzzements. Einzelfalluntersuchungen sind dennoch immer notwendig. Durch die Mischung der Zwischenprodukte können auch besonders breite Korngrößenverteilungen hergestellt werden. Hierdurch können Zementeigenschaften (z.B. niedrigerer Wasseranspruch) gezielter eingestellt werden als bei Verwendung einzelner Mahlanlagen.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen haben gezeigt, dass die Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte selbst großen Einfluss bei der Nachbildung einer Korngrößenverteilung haben. Die Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt sollten durch Änderungen im Betrieb der Mühle bestmöglich an die Referenz-Korngrößenverteilung angenähert werden. Werden Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt mit ausreichender Feinheit verwendet, kann auch mit geringem Materialanteil aus dem 2. Mahlschritt eine niedrige Abweichung zur Referenz-Korngrößenverteilung erreicht werden. Besonders bei hoher Zielfeinheit sind zusätzliche Feinstanteile nötig. Der noch fehlende Teil der Korngrößenverteilung der Mischung muss identifiziert und falls nötig durch maximal zwei Zwischenprodukte im 2. Mahlschritt nachgebildet werden.

Der spezifische Energiebedarf bei der separaten Feinstmahlung wurde durch Untersuchungen mit Anlagen in Industrieumgebung bewertet. Hierzu wurden exemplarisch für die Hochdruckzerkleinerung im 1. Mahlschritt eine Argo-Mühle und für die Feinstmahlung im 2. Mahlschritt eine Netzsch-Rührwerkskugelmühle verwendet. Der verwendete Klinker wurde ohne Sulfatträger und ohne Mahlhilfsmittel gemahlen. Dennoch wurde der spezifische Energiebedarf im Vergleich zur Werkskugelmühle um 15-25 % reduziert. Darüber hinaus wurde beispielhaft dargestellt, dass der spezifische Energiebedarf der Rührwerkskugelmühle durch Mahlhilfsmittel um 20-50 % verringert werden kann. Zudem war die verwendete Argo-Mühle durch den verwendeten Sieb in ihrer Feinheit stark limitiert. Bei Verwendung einer besser geeigneten Mühle im 1. Mahlschritt kann das Ergebnis nochmal verbessert werden. Dementsprechend kann durch die separate Feinstmahlung der spezifische Energiebedarf von Zementen reduziert werden.

Zur weiterführenden Untersuchung der separaten Feinstmahlung ist die Entwässerung von Gips in der Rührwerkskugelmühle zu betrachten. Werden die Sulfatträger erst bei der Feinstmahlung hinzugefügt, ist ein geeignetes Konzept zu erarbeiten, wie der SO_3 -Gehalt in den jeweiligen Mischungen richtig eingestellt werden kann. Dies ist besonders bei der Verwendung von Zwischenprodukten aus dem 2. Mahlschritt in mehreren Mischzementen notwendig. Auch müssen die Verwendung von Mahlhilfsmitteln und weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker in weiterführenden Untersuchungen betrachtet werden.

12 Literatur

- [Alt 2013] Altun, Okay. *Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits: Submitted to Institute of Graduate Studies in Scienc of Hacettepe University as a partial fulfillment to the requirements for the award of the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY in MINING ENGINEERING*. Ankara: Hacettepe University 2013
- [Alt; Ben; End 2014] Altun, Okay; Benzer, Hakan; Enderle, Udo. *The effects of chamber diameter and stirrer design on dry horizontal stirred mill performance*. Minerals Engineering 2014, **69**, S. 24-28
- [And; And 1930] Andersen, J.; Andreasen, A.. *Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)*. Kolloidzeitschrift 1930, **50**, S. 217-228
- [Ant; Bid; Bla; Nic 2001] Anthony, John W.; Bideaux, Richard A.; Bladh, Kenneth W.; Nichols, Monte C.. *Handbook of Mineralogy*. Mineralogical Society of America 2001
- [Avc 2018] Avci, Ilker. *NUH Cimento's Largest Upgrade Project in Europe using KHD Roller Press Technology*. VDZ Congress 2018
- [Bek 1981] Beke, Béla. *The Process of Fine Grinding. Developments in Mineral Science and Engineering*. Dordrecht: Springer 1981
- [Cil 2011] Cilas. *Particle Size Analyzers User manual*. ORLEANS CEDEX, FRANCE: Cilas 2011
- [Cil 2017] Cilas. *Datenbank Brechungsindizes*. 2017
- [DIN 66126-2] 1989. *Bestimmung der spezifischen Oberfläche disperser Feststoffe mit Durchströmungsverfahren, Teil 2: Verfahren und Gerät nach Blaine*
- [Drü 2018] Drüphake, Peer. *The Argo Mill- First operation experiences and application examples*. 9th Interanational Symposium on Fine Grinding and Dispersing, October 11th-12th 2018, S. 31-32
- [ECR 2015] ECRA. *ECRA Future Grinding Technologies Project – Report about Phase I: Evaluation of roundtable event*. Düsseldorf: European Cement Research Academy, ECRA 2015

- [ECR 2019] ECRA. *ECRA Future Grinding Technologies Project Report about Phase II*. Düsseldorf, bisl. unveröffentlicht: European Cement Research Academy, ECRA 2019
- [Fa. Eirich 2017] Fa. Eirich. *MaxxMill® Agitated media mill for dry and wet grinding*. Hardheim: Eirich 2017
- [Fa. Eirich 2004] Fa. Eirich. *Eirich MaxxMill® Informationsblatt Zementklinker*. Hardheim: Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG 2004
- [Fa. Netzsch 2017] Fa. Netzsch. *NETZSCH SpheRho® Die Rührwerkskugelmühle zur trockenen Feinstvermahlung*. Produktinformationsblatt 2017, S. <https://www.netzsch-grinding.com/de/produkte-loesungen/trockenmahlen/trockene-ruehrwerkskugelmuehle-spherho/> Zugriff: 22.03.2019
- [Fah 2013] Fahrland, Th.. *Cements ground in the vertical roller mill fulfil the quality requirements of the market*. Cement International 2013, S. 64-69
- [Fis 1967] Fischer, W.. *Fließverhalten von Zement*. Zement-Kalk-Gips 1967, S. 138-139
- [Fle 2014] Fleiger, Philipp M.. *Einfluss der Gattierung auf die Beanspruchungssituation und Zerkleinerung bei der Feinmahlung von Zement*. Düsseldorf: Verlag Bau u. Technik 2014
- [Fle; Mül 2018] Fleiger, Philipp; Müller-Pfeiffer, Michael. *Trends in Grinding Technologies (Report from VDZ's Working Group Grinding Technology)*. 8th International VDZ-Congress 2018
- [Fue; Abo 2002] Fuerstenau, D.W.; Abouzeidb, A.-Z.M.. *The energy efficiency of ball milling in comminution*. International Journal of Mineral Processing 2002, **67**, S. 161-185
- [Ful; Tho 1907] Fuller, W.B.; Thompson, S.E.. *The law of proportioning concrete*. American society of civil engineers 1907, **3**, S. 222-298
- [Gis 2011] Giske, Kristina . *GPU basierte Parallelisierung von deformierbaren Registrierungsverfahren als Grundlage für dynamische Anpassungen von Therapieplänen in der adaptiven Strahlentherapie*. Heidelberg: Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität 2011

- [Haa 2016] Haarmann, Matthias. *Auswahl, Implementierung und Validierung von Modellierungskonzepten für die trockene Feinzerkleinerung*. Masterarbeit, TU Braunschweig / ECRA 2016
- [Han 1973] Hansen, F.E.. *Entwässerung von Gips*. Zement-Kalk-Gips 1973, S. 223-226
- [Hoe 2013] Hoenig, V.. *Energieeffizienz bei der Zementherstellung: Teil 1, Teil 2*. Cement International 2013, S. 50-67, 46-65
- [ISO 13320-1 1999-11] ISO 13320-1. *Partikel size analysis - Laser diffraction methods, Part 1: General principles*,. ISO 13320-1 1999-11
- [Jan 2003] Jankovic, A.. *Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills*. Minerals Engineering 2003, **16**, S. 337–345
- [Kar; Mül; Pol 1996] Karbstein, H; Müller, F; Polke, R. *Scale up bei der Echtzerkleinerung in Rührwerkskugelmöhlen*. 1996, **10**, S. 469-479
- [Kuh 1985] Kuhlmann, Karl. *Verbesserung der Energieausnutzung beim Mahlen von Zement. Dissertation RWTH Aachen*. Schriftenreihe der Zementindustrie 1985, **44**
- [Kuh 1985] Kuhlmann, Karl. *Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement: Teil 1: Festigkeit von Portlandzement*. Zement-Kalk-Gips 1985, S. 169-178
- [Kuh 1985] Kuhlmann, Karl. *Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement: Teil 2: Wasseranspruch von Portlandzement*. Zement-Kalk-Gips 1985, S. 528-534
- [Kur; Goc 1997] Kurrer, K.-E.; Gock, E.. *Exzenter-Schwingmöhlen für die Feinstzerkleinerung*. Zement-Kalk-Gips 1997, **7**, S. 263-373
- [Kus; Wij; Tho 1991] Kusters, Karl, A.; Wijers, Johan G.; Thoenes, Dirk. *Particle sizing by laser diffraction spectrometry in the anomalous regime*. APPLIED OPTICS 1991, **Vol.30, No. 33**, S. 4839-4847
- [Kwa 2015] Kwade, Arno. *Effiziente Zerkleinerungstechnik in der Zementindustrie: Herausforderungen und Potentiale*,. Düsseldorf: VDZ-Jahrestagung 2015 2015
- [Lag; Ree; Wri; Wri 1998] Lagarias, Jeffrey C.; Reeds, James A.; Wright, Margaret H.; Wright, Paul E.. *Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions*. SIAM Journal of Optimization 1998, **9**, S. 112–147

- [Loc 2000] Locher, Friedrich W.. *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik 2000
- [Loc 1966] Locher, Friedrich W.. *Einfluß der Mahlfeinheit und der Kornverteilung auf die Eigenschaften von Portland- und Hüttenzementen sowie von hydraulischen Kalken*. Tonindustrie-Zeitung 1966, S. 547-554
- [Loc 2000] Locher, Friedrich W.. *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik 2000
- [Mit 1996] Mittal, P.K.. *Experience in separate grinding systems for blended cement*. . World Cement 1996, S. 42-44
- [Mül 2000] Müller-Pfeiffer, Michael. *Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen durch gemeinsames oder getrenntes Mahlen und Mischen*. Schriftenreihe der Zementindustrie 2000, **61**
- [Mül; Fle 2018] Müller-Pfeiffer, Michael; Fleiger, Philipp. *Trends in Grinding Technologies (Report from VDZ's Working Group Grinding Technology)*. VDZ Congress 2018
- [Nei; Nab; Mou; Gop; Fri 2009] Neikov, O.D.; Naboychenko, S.; Mourachova, I.B.; Gopienko, V.G.; Frishberg, D.V.. *Handbook of Non-ferrous Metal Powders: Technologies and Applications*. Elsevier 2009
- [Pah 1991] Pahl, Manfred H.. *Zerkleinerungstechnik*. Köln: TÜV Rheinland 1991
- [Pal; Azi; Hus; Has 2008] Palaniandy, S; Azizli, K; Hussin, H; Hashim, S. *Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill*. Minerals Engineering 2008, **21**, S. 380ff
- [Pal 2009] Palm, Sebastian. *Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2009
- [Prz; Ha; Bre; Kwa 2018] Prziwara, Paul; Hamilton, L.D.; Breitung-Faes, Sandra; Kwade, Arno. *Impact of grinding aids and process parameters on dry stirred media milling*. Powder Technology 2018, **335**, S. 114-123
- [Prz; Bre; Kwa 2018] Prziwara, Paul; Breitung-Faes, Sandra; Kwade, Arno. *Impact of the powder flow behavior on continuous grinding in dry operated stirred media mills*. Minerals Engineering 2018, **128**, S. 215-223

- [Rác; Tam 2018] RÁCZ, ÁDÁM; TAMÁS, LÁSZLÓ. *Optimization of the air flow rate in a laboratory scale horizontal continuous dry stirred media mill*. 9th International Symposium on Fine Grinding and Dispersing 2018, S. 26-27
- [Rei 2005] REICHARDT, ROLAND. *Ereignisdiskrete Simulation einer Hochenergie-Kugelmühle*. Universität Siegen, Dissertation: 2005
- [Res 2001] RESCHKE, THORSTEN. *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Düsseldorf: 2001
- [Rim; Dem; Bow 1994] RIMAI, D. S.; DEMEJO, L. P.; BOWEN, R. *Mechanics of Particle Adhesion*. 1994, **11**, S. S. 1333-1355
- [Rum 1958] RUMPF, H.. *Grundlagen und Methoden des Granulierens*. Chemie-Ingenieur-Technik 1958, S. 144-158
- [Sac 2000] SACHWEH, JENS. *MaxxMill - Trocken- und Nassmahlung mit Rührwerkskugelmühlen im Vergleich mit konventionellen Trommelmühlen*. Aufbereitungstechnik 2000, **41**, S. 278-283
- [Sch 1992] SCHILLER, BERND. *Mahlbarkeit der Hauptbestandteile des Zements und ihr Einfluß auf den Energieaufwand beim Mahlen und die Zementeigenschaften*. Düsseldorf: Beton-Verl. 1992
- [Sch; Sch 2014] SCHMITT, OLIVER; SCHUSTER, THOMAS. *Reviewing a decade of online particle sizing*. World Cement 2014, S. 75-81
- [Sch 1999] SCHNATZ, R.. *Beschreibung und Reproduzierbarkeit gemessener Korngrößenverteilungen feingemahlener Stoffe*. Zement-Kalk-Gips 1999, S. 57-67, 128-133
- [Sch 1998] SCHNATZ, ROBERT. *Verarbeitungseigenschaften von Zement bei der Fertigmahlung in Mahlanlagen mit Gutbett-Walzenmühle*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik 1998
- [Sch 1971] SCHÖNERT, K. *Die Grenze der Zerkleinerung bei kleinen Korngrößen*. Chemie-Ing-Techn. 1971, **13**, S. 773-777
- [Sch 1979] SCHÖNERT, K.. *Energetische Aspekte des Zerkleinerns spröder Stoffe*. Zement-Kalk-Gips 1979, S. 1-9
- [Sch 1988] SCHÖNERT, K.. *Aspects of very fine grinding*. Challenges in mineral processing 1988
- [See 2008] SEEMANN, STEFAN. *Einfluss des Mahlsystems und der Mahlatmosphäre auf die Zementeigenschaften: Dissertation zur*

- Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften*. Clausthal: o. Verl. 2008
- [Sep 1981] Sepulveda, J. L.. *A detailed study on stirred ball mill grinding. Ph. D thesis*. Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah, the USA 1981
- [Spr; Kuh; Ell 1985] Sprung, S; Kuhlmann, K; Ellerbrock, H.-G. *Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement, Teil 2: Wasseranspruch von Portlandzement*. Zement-Kalk-Gips 1985, **38**, S. 2-8
- [Sti 1994] Stieß, Matthias. *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Berlin: Springer 1994
- [Sun; Hoh; Cao 2013] Sun, Hongfang; Hohlc, Brian; Cao, Yizheng. *Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength*. Cement & Concrete Composites 2013, **44**, S. 41-49
- [Syn 2018] Synergie. *Kopernikus-Projekt „Industrieprozesse“: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. bislang unv. 2018
- [Tre 2013] Treiber, Kevin. *Optimierung der Betriebsparameter einer Rührwerkskugelmühle unter Berücksichtigung verschiedener Mahlkammergeometrien*. Masterarbeit, FH Düsseldorf 2013
- [Tre; Fle 2015] Treiber, Kevin; Fleiger Philipp. *Optimization Of The Powder And Ball Movement Inside A High-Speed Horizontal Attrition Mill For Dry Grinding..* Conference Proceedings: European Symposium on Comminution & Classification, Göteborg 2015
- [Tre; Lud 2001] Trenkwalder, J; Ludwig, H.-M.. *Herstellung hüttensandhaltiger Zemente durch getrenntes Mahlen und Mischen im Zementwerk Karlstadt*. Zement-Kalk-Gips 2001, **54**, S. 480-491
- [VDZ 2019] VDZ, Verein Deutscher Zementwerke e.V.. *Verfahrenstechnisches Merkblatt: Zerkleinerungstechnik*. Düsseldorf: bislang unv. 2019
- [VDZ 2018] VDZ, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg. *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018*. Duesseldorf: 2018
- [VDZ 2008] VDZ. *Zement-Taschenbuch 2008*. Düsseldorf: Verlag Bau u. Technik 2008

- [VDZ 2018] VDZ. *Zahlen und Daten: 2018 ; Stand: August 2018 ; Zementindustrie in Deutschland*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ 2018
- [Wol 1988] Wolter, Albrecht. *Einfluß der Rollenpresse auf die Zementeigenschaften*. Zement-Kalk-Gips 1988, S. 64-70
- [Xue; Zho 2009] Xue-dong, L; Zhong-shu, C. *Study on the Flow Field in the Chamber of a Fluidized Bed Opposed Superfine Jet Mill*. WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, CSIE 2009. 2009, **1**, S. 689 - 693
- [Yan; Jen 1995] Yang, M.; Jennigs, H. M.. *Influence of Mixing Methode on the Microstructure and Rheological Behaviour of Cement Paste*. Advanced Cement Based Materials 1995, **2**, S. 70-78
- [Zim; Ebe; Mey 2004] Zimmermann, I.; Eber, M.; Meyer, K.. *Nanomaterials as flow regulators in dry powders*. Zeitschrift für physikalische Chemie 2004, **218**, S. 51-102

13 Anhang

A Tabellen

Tabelle A-13-1 Anteile der Sulfatträger im Zement

	Anhydrit	Gips (entwässert)	Gewünschter SO ₃ -Gehalt im Klinker
Klinker 1	2,64 M.-%	2,60 M.-%	3,36 M.-%
Klinker 2	2,21 M.-%	2,25 M.-%	3,50 M.-%
Klinker 3 (CEM I 42,5 N)	2,00 M.-%	2,04 M.-%	2,59 M.-%
Klinker 3 (CEM I 52,5 N) (CEM I 52,5 R)	2,27 M.-%	2,28 M.-%	3,36 M.-%

Tabelle A-13-2 Daten Mahlversuche Mahlhilfen DEG

Konzentration	Mahldauer in Sek.	Lageparameter in µm	Steigungsmaß	Spez. Energiebedarf in kWh/t
0,0500 M.-%	60	10,29	0,80	103,7
	90	9,44	0,79	155,4
	120	9,36	0,78	207,1
0,0250 M.-%	60	9,69	0,78	106,5
	90	8,89	0,75	157,7
	120	8,65	0,73	207,6
0,0125 M.-%	15	13,61	0,91	25,4
	30	10,37	0,85	49,7
	60	8,40	0,78	104,7
	90	8,10	0,78	155,2
	120	7,34	0,75	204,6
	150	7,27	0,75	254,3
	180	6,37	0,72	302,8

Tabelle A-13-3 Daten Mahlversuche Mahlhilfen TIPA

Konzentration	Mahldauer in Sek.	Lageparameter in µm	Steigungsmaß	Spez. Energiebedarf in kWh/t
0,0500 M.-%	15	14,20	0,93	25,3
	30	10,31	0,87	51,6
	60	8,64	0,79	109,8
	90	7,65	0,76	164,8
	120	7,54	0,75	219,0
0,0250 M.-%	60	8,77	0,78	108,4
	90	7,90	0,75	161,6
	120	7,48	0,74	214,0

Tabelle A-13-4

Charakterisierung der vorgemahlten Klinker aus der Vertikal-Wälzmühle durch die RRSB-Parameter, die spezifische Oberfläche nach Blaine und die Korngrößenverteilungen

Bezeichnung	Lageparameter x' in μm	Steigungsmaß n	Spez. Oberfläche nach Blaine in cm^2/g	Spez. Energiebe- darf in kWh/t
Klinker 1				
Klinker 1 2200	26,17	0,97	2150	62
Klinker 1 2600	20,16	1,04	2550	77
Klinker 1 3000	20,06	1,02	2980	94
Klinker 1 4400	10,89	1,09	4360	178
Klinker 2				
Klinker 2 2200	27,83	1,06	2160	61
Klinker 2 2600	22,02	1,16	2630	86
Klinker 2 3000	20,87	1,09	2970	101
Klinker 2 4400	12,05	1,04	4400	231

Tabelle A-13-5 Korngrößenverteilungen von Klinker 1, gemahlen in der kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle

	2200 cm ² /g	2600 cm ² /g	3000 cm ² /g	3600 cm ² /g	4400 cm ² /g
x in µm	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Grob			Mittelfein	
0,5	0,050	0,056	0,035	0,025	0,054
1	0,075	0,084	0,065	0,059	0,096
2	0,111	0,126	0,114	0,108	0,156
3	0,144	0,163	0,158	0,144	0,216
4	0,174	0,198	0,198	0,162	0,277
5	0,203	0,230	0,235	0,210	0,337
6	0,229	0,261	0,270	0,259	0,393
7	0,254	0,289	0,302	0,327	0,445
7,5	0,265	0,303	0,317	0,348	0,470
8	0,277	0,316	0,332	0,369	0,494
9	0,298	0,342	0,361	0,408	0,540
10	0,319	0,367	0,389	0,428	0,584
11	0,340	0,391	0,415	0,466	0,624
12	0,360	0,414	0,440	0,504	0,662
13	0,380	0,437	0,464	0,541	0,697
14	0,399	0,459	0,488	0,578	0,729
15	0,418	0,481	0,512	0,614	0,759
16	0,436	0,502	0,535	0,650	0,786
17	0,455	0,524	0,558	0,684	0,811
18	0,473	0,545	0,581	0,716	0,834
19	0,490	0,566	0,604	0,748	0,854
20	0,508	0,587	0,627	0,778	0,872
22	0,541	0,629	0,673	0,806	0,903
25	0,588	0,691	0,742	0,855	0,939
28	0,631	0,751	0,807	0,911	0,964
32	0,684	0,823	0,876	0,948	0,984
36	0,731	0,882	0,925	0,977	0,994
38	0,753	0,907	0,944	0,992	0,997
40	0,774	0,928	0,959	0,996	0,998
45	0,823	0,967	0,985	0,998	1,000
50	0,865	0,989	0,996	1,000	1,000
53	0,888	0,996	0,999	1,000	1,000
56	0,908	1,000	1,000	1,000	1,000
63	0,947	1,000	1,000	1,000	1,000
71	0,976	1,000	1,000	1,000	1,000
75	0,985	1,000	1,000	1,000	1,000
80	0,993	1,000	1,000	1,000	1,000
85	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000
90	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-6

Korngrößenverteilungen von Klinker 2, gemahlen in der
kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle

	2200 cm ² /g	2600 cm ² /g	3000 cm ² /g	4400 cm ² /g
x in µm	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Grob			Mittelfein
0,5	0,043	0,029	0,032	0,055
1	0,069	0,055	0,061	0,098
2	0,099	0,096	0,105	0,164
3	0,127	0,133	0,144	0,225
4	0,154	0,166	0,180	0,282
5	0,179	0,196	0,213	0,333
6	0,202	0,224	0,244	0,380
7	0,224	0,251	0,274	0,421
7,5	0,235	0,264	0,288	0,441
8	0,246	0,277	0,302	0,459
9	0,266	0,303	0,329	0,495
10	0,287	0,327	0,355	0,529
11	0,306	0,351	0,380	0,563
12	0,326	0,374	0,405	0,597
13	0,344	0,396	0,428	0,630
14	0,363	0,418	0,451	0,663
15	0,381	0,439	0,472	0,696
16	0,399	0,460	0,494	0,728
17	0,416	0,482	0,514	0,759
18	0,433	0,503	0,535	0,788
19	0,450	0,524	0,555	0,815
20	0,466	0,545	0,575	0,839
22	0,499	0,589	0,615	0,881
25	0,546	0,656	0,677	0,928
28	0,592	0,723	0,737	0,960
32	0,653	0,803	0,810	0,984
36	0,713	0,868	0,871	0,995
38	0,742	0,894	0,896	0,997
40	0,770	0,916	0,916	0,999
45	0,833	0,955	0,954	1,000
50	0,883	0,978	0,977	1,000
53	0,908	0,986	0,986	1,000
56	0,928	0,992	0,992	1,000
63	0,963	0,998	0,998	1,000
71	0,986	1,000	1,000	1,000
75	0,992	1,000	1,000	1,000
80	0,997	1,000	1,000	1,000
85	0,999	1,000	1,000	1,000
90	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-7

Validierungsrechnung Daten

Mie-Theorie

M1	M2	Modell soll		Modell berechnet		Mischungsverhältnis	
		x'	n	x'	n	M1 soll	M2 soll
Klinker 1 2200	KL_1a	16,31	0,69	16,40	0,69	0,50	0,50
Klinker 1 2200	KL_1b	17,77	0,74	17,50	0,73	0,50	0,50
Klinker 1 2600	KL_1a	14,18	0,73	14,59	0,74	0,50	0,50
Klinker 1 2600	KL_1b	15,48	0,78	15,13	0,77	0,50	0,50
Klinker 1 3000	KL_1a	13,50	0,71	13,77	0,72	0,50	0,50
Klinker 1 3000	KL_1b	14,80	0,76	14,61	0,75	0,50	0,50
Klinker 1 3600	KL_1a	11,09	0,77	11,30	0,79	0,50	0,50
Klinker 1 3600	KL_1b	12,18	0,83	12,26	0,83	0,50	0,50

Fraunhofer

M1	M2	Modell soll		Modell berechnet		Mischungsverhältnis	
		x'	n	x'	n	M1 soll	M2 soll
Klinker 1 2200	KL_1a	17,95	0,81	17,71	0,81	0,50	0,50
Klinker 1 2200	KL_1b	18,36	0,81	17,58	0,80	0,50	0,50
Klinker 1 2600	KL_1a	15,58	0,87	16,16	0,89	0,50	0,50
Klinker 1 2600	KL_1b	15,94	0,87	16,47	0,89	0,50	0,50
Klinker 1 3000	KL_1a	14,96	0,85	15,20	0,86	0,50	0,50
Klinker 1 3000	KL_1b	15,31	0,85	14,98	0,84	0,50	0,50
Klinker 1 3600	KL_1a	12,45	0,95	12,75	0,98	0,50	0,50
Klinker 1 3600	KL_1b	12,74	0,94	13,26	1,02	0,50	0,50

Tabelle A-13-8

Ergebnisse der Nachmahlung von Klinker 1 in der
diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Beanspruchungsdauer in Sek.	Spez. Energiebedarf der Nachmahlung kWh/t	Lageparameter x' in µm	Steigungsmaß n
Klinker 1 – 2200			
0	-		
15	26,3	15,4	0,89
30	53,7	12,32	0,84
45	82,9	10,27	0,79
60	110,5	10,79	0,75
75	139,7	9,78	0,73
90	172,4	10,18	0,73
Klinker 1 – 2600			
0	-		
15	26,3	12,10	0,80
30	53,7	10,78	0,81
45	82,9	10,56	0,80
60	109,6	9,83	0,75
Klinker 1 – 3000			
0	-		
15	26,5	12,55	0,83
30	54,5	10,85	0,81
45	82,6	10,06	0,77
60	112,4	9,00	0,77
Klinker 1 – 4400			
0	-		
15	26,1	8,48	0,85
30	54,5	7,34	0,84
45	83,4	7,16	0,82

Tabelle A-13-9

Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 1 – 2200
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60	75	90
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Grob	Mittelfein				
0,5	0,049	0,062	0,083	0,084	0,098	0,093
1	0,097	0,123	0,156	0,159	0,180	0,173
2	0,176	0,219	0,264	0,270	0,294	0,289
3	0,235	0,287	0,338	0,343	0,369	0,365
4	0,282	0,339	0,393	0,395	0,422	0,417
5	0,322	0,382	0,437	0,437	0,464	0,459
6	0,358	0,422	0,476	0,474	0,500	0,494
6,5	0,374	0,440	0,495	0,491	0,517	0,511
7	0,390	0,457	0,512	0,507	0,534	0,526
7,5	0,406	0,474	0,528	0,522	0,549	0,541
8	0,420	0,490	0,544	0,537	0,564	0,555
8,5	0,435	0,505	0,560	0,550	0,578	0,569
9	0,449	0,520	0,574	0,564	0,591	0,582
10	0,475	0,548	0,602	0,589	0,616	0,606
11	0,500	0,573	0,628	0,612	0,639	0,629
12	0,524	0,597	0,652	0,634	0,661	0,650
13	0,547	0,620	0,675	0,654	0,681	0,669
14	0,569	0,642	0,696	0,674	0,699	0,688
15	0,590	0,664	0,717	0,693	0,718	0,706
16	0,611	0,685	0,737	0,711	0,736	0,723
17	0,631	0,705	0,757	0,729	0,753	0,740
18	0,651	0,725	0,776	0,747	0,770	0,756
19	0,670	0,745	0,794	0,765	0,787	0,773
20	0,689	0,764	0,812	0,782	0,804	0,789
22	0,727	0,802	0,845	0,815	0,836	0,820
25	0,782	0,851	0,887	0,859	0,878	0,862
28	0,832	0,891	0,921	0,897	0,912	0,898
32	0,886	0,933	0,954	0,937	0,947	0,936
36	0,925	0,962	0,975	0,964	0,971	0,963
38	0,941	0,973	0,982	0,974	0,979	0,973
40	0,954	0,981	0,988	0,981	0,985	0,981
45	0,977	0,993	0,996	0,993	0,995	0,993
50	0,990	0,998	0,999	0,998	0,998	0,998
53	0,994	0,999	1,000	0,999	1,000	0,999
56	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
63	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
71	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-10 Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 1 – 2600
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein			
0,5	0,073	0,075	0,071	0,094
1	0,139	0,144	0,143	0,172
2	0,237	0,248	0,256	0,284
3	0,305	0,320	0,332	0,358
4	0,356	0,374	0,386	0,411
5	0,398	0,420	0,430	0,455
6	0,434	0,460	0,469	0,492
6,5	0,452	0,479	0,487	0,510
7	0,468	0,497	0,505	0,527
7,5	0,484	0,513	0,521	0,543
8	0,499	0,529	0,537	0,558
8,5	0,513	0,545	0,552	0,573
9	0,527	0,559	0,567	0,587
10	0,554	0,587	0,594	0,613
11	0,578	0,612	0,620	0,637
12	0,601	0,637	0,643	0,660
13	0,623	0,660	0,666	0,682
14	0,644	0,682	0,688	0,702
15	0,664	0,703	0,708	0,722
16	0,683	0,724	0,729	0,741
17	0,703	0,745	0,749	0,760
18	0,721	0,765	0,768	0,778
19	0,740	0,785	0,787	0,797
20	0,759	0,804	0,806	0,814
22	0,794	0,840	0,841	0,848
25	0,842	0,886	0,886	0,891
28	0,884	0,921	0,921	0,924
32	0,927	0,955	0,955	0,957
36	0,958	0,976	0,976	0,977
38	0,970	0,983	0,983	0,984
40	0,978	0,989	0,989	0,989
45	0,992	0,996	0,996	0,996
50	0,998	0,999	0,999	0,999
53	0,999	1,000	1,000	1,000
56	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-11 Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 1 – 3000
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60	75	90
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein					
0,5	0,061	0,075	0,086	0,090	0,108	0,121
1	0,122	0,144	0,162	0,174	0,196	0,217
2	0,219	0,248	0,274	0,294	0,318	0,347
3	0,287	0,320	0,349	0,372	0,400	0,430
4	0,339	0,374	0,403	0,428	0,457	0,487
5	0,382	0,418	0,447	0,473	0,502	0,532
6	0,420	0,458	0,485	0,513	0,541	0,570
6,5	0,438	0,476	0,503	0,531	0,559	0,588
7	0,454	0,494	0,520	0,549	0,577	0,605
7,5	0,471	0,511	0,537	0,565	0,593	0,621
8	0,486	0,527	0,552	0,581	0,609	0,636
8,5	0,501	0,542	0,567	0,596	0,624	0,651
9	0,515	0,556	0,581	0,611	0,639	0,665
10	0,543	0,584	0,608	0,637	0,666	0,691
11	0,568	0,610	0,632	0,662	0,690	0,715
12	0,592	0,635	0,655	0,686	0,713	0,738
13	0,615	0,658	0,677	0,708	0,735	0,759
14	0,637	0,681	0,698	0,729	0,755	0,779
15	0,658	0,703	0,718	0,750	0,775	0,798
16	0,678	0,724	0,738	0,770	0,794	0,816
17	0,698	0,745	0,757	0,790	0,813	0,834
18	0,717	0,765	0,776	0,809	0,831	0,851
19	0,736	0,784	0,794	0,828	0,848	0,866
20	0,755	0,803	0,812	0,846	0,865	0,881
22	0,791	0,838	0,846	0,880	0,894	0,908
25	0,839	0,883	0,889	0,920	0,931	0,940
28	0,881	0,918	0,923	0,951	0,959	0,964
32	0,925	0,952	0,955	0,977	0,982	0,984
36	0,956	0,974	0,977	0,992	0,994	0,995
38	0,968	0,982	0,983	0,995	0,997	0,997
40	0,977	0,987	0,989	0,998	0,998	0,999
45	0,991	0,996	0,996	1,000	1,000	1,000
50	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000
53	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
56	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-12 Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 1 – 4400
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45
x in μm	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein		
0,5	0,085	0,097	0,101
1	0,158	0,178	0,186
2	0,270	0,301	0,313
3	0,351	0,388	0,401
4	0,413	0,454	0,465
5	0,465	0,507	0,517
6	0,510	0,554	0,562
6,5	0,532	0,576	0,584
7	0,553	0,598	0,604
7,5	0,573	0,618	0,624
8	0,593	0,637	0,643
8,5	0,612	0,656	0,662
9	0,630	0,674	0,680
10	0,664	0,708	0,714
11	0,696	0,738	0,744
12	0,725	0,767	0,772
13	0,752	0,792	0,797
14	0,776	0,816	0,820
15	0,799	0,838	0,842
16	0,821	0,858	0,861
17	0,841	0,877	0,879
18	0,859	0,894	0,895
19	0,876	0,909	0,910
20	0,891	0,923	0,923
22	0,918	0,946	0,946
25	0,949	0,971	0,971
28	0,970	0,987	0,987
32	0,988	0,997	0,997
36	0,996	1,000	1,000
38	0,998	1,000	1,000
40	0,999	1,000	1,000
45	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-13 Ergebnisse der Nachmahlung von Klinker 2 in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Beanspruchungsdauer in Sek.	Spez. Energiebedarf der Nachmahlung kWh/t	Lageparameter x' µm	Steigungsmaß n
Klinker 2 – 2200			
0	-	-	-
15	24,8	16,30	0,89
30	51,8	12,19	0,82
45	79,7	9,98	0,77
60	104,6	9,13	0,76
75	135,6	8,19	0,73
90	168,3	8,06	0,71
Klinker 2 – 2600			
0	-	-	-
15	24,8	13,53	0,85
30	49,4	10,85	0,79
45	74,7	8,99	0,77
60	100,0	8,11	0,77
Klinker 2 – 3000			
0	-	-	-
15	24,2	13,45	0,87
30	49,3	10,64	0,81
45	74,7	8,83	0,78
60	99,8	7,95	0,77
Klinker 2 – 4400			
0	-	-	-
15	24,0	9,27	0,90
30	48,9	8,12	0,85
45	74,1	7,17	0,81

Tabelle A-13-14 Produktbeschreibungen der industriell hergestellten Zemente

		CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 R
Lageparameter nach RRSB	µm	25,2	18,8	10,4
Steigungsmaß nach RRSB	-	0,93	0,96	0,94
Spez. Oberfläche nach Blaine	cm²/g	3050	3510	5160
Spez. Energiebedarf	kWh/t	37,1	42,8	71,5

Tabelle A-13-15

Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 2 – 2200
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60	75	90	105	120
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Grob	Mittelfein						
0,5	0,054	0,071	0,092	0,095	0,111	0,116	0,126	0,135
1	0,099	0,133	0,166	0,176	0,199	0,209	0,220	0,244
2	0,169	0,225	0,272	0,292	0,322	0,334	0,349	0,387
3	0,224	0,293	0,347	0,370	0,403	0,414	0,436	0,475
4	0,270	0,346	0,403	0,428	0,460	0,471	0,496	0,535
5	0,308	0,390	0,449	0,474	0,506	0,515	0,542	0,582
6	0,343	0,429	0,488	0,514	0,545	0,553	0,582	0,621
6,5	0,359	0,447	0,506	0,533	0,563	0,570	0,600	0,639
7	0,374	0,463	0,523	0,550	0,580	0,587	0,617	0,655
7,5	0,389	0,480	0,539	0,566	0,596	0,602	0,633	0,671
8	0,404	0,495	0,554	0,582	0,611	0,616	0,648	0,686
8,5	0,418	0,510	0,569	0,597	0,625	0,629	0,662	0,700
9	0,432	0,524	0,584	0,611	0,639	0,642	0,676	0,713
10	0,458	0,551	0,611	0,637	0,664	0,666	0,701	0,737
11	0,483	0,577	0,636	0,661	0,687	0,688	0,723	0,759
12	0,507	0,601	0,660	0,684	0,709	0,709	0,744	0,779
13	0,530	0,624	0,682	0,706	0,729	0,729	0,764	0,797
14	0,551	0,646	0,703	0,726	0,749	0,748	0,782	0,814
15	0,572	0,667	0,724	0,746	0,768	0,766	0,799	0,830
16	0,593	0,687	0,743	0,765	0,786	0,783	0,816	0,846
17	0,613	0,707	0,762	0,783	0,803	0,800	0,832	0,861
18	0,632	0,726	0,780	0,801	0,820	0,817	0,847	0,875
19	0,651	0,745	0,798	0,818	0,837	0,833	0,862	0,889
20	0,669	0,763	0,814	0,835	0,853	0,848	0,876	0,901
22	0,706	0,798	0,846	0,866	0,883	0,877	0,902	0,924
25	0,760	0,845	0,887	0,905	0,920	0,914	0,934	0,952
28	0,810	0,885	0,919	0,935	0,949	0,943	0,960	0,972
32	0,865	0,928	0,952	0,964	0,976	0,970	0,982	0,988
36	0,908	0,958	0,974	0,982	0,991	0,987	0,993	0,996
38	0,926	0,969	0,981	0,987	0,995	0,991	0,996	0,998
40	0,941	0,978	0,987	0,991	0,997	0,995	0,998	0,999
45	0,968	0,992	0,995	0,997	1,000	0,999	1,000	1,000
50	0,984	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
53	0,990	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
56	0,994	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
63	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
71	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-16

Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 2 – 2600
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein			
0,5	0,065	0,083	0,101	0,099
1	0,120	0,151	0,178	0,185
2	0,205	0,252	0,289	0,308
3	0,270	0,324	0,368	0,390
4	0,319	0,378	0,426	0,451
5	0,359	0,423	0,473	0,500
6	0,395	0,461	0,513	0,542
6,5	0,412	0,479	0,531	0,561
7	0,429	0,496	0,549	0,579
7,5	0,444	0,513	0,565	0,596
8	0,459	0,528	0,581	0,612
8,5	0,474	0,543	0,596	0,628
9	0,488	0,558	0,611	0,642
10	0,515	0,585	0,638	0,669
11	0,541	0,610	0,664	0,695
12	0,565	0,634	0,688	0,719
13	0,587	0,656	0,710	0,742
14	0,609	0,678	0,732	0,763
15	0,631	0,698	0,752	0,784
16	0,651	0,719	0,772	0,804
17	0,672	0,738	0,791	0,823
18	0,692	0,758	0,810	0,840
19	0,712	0,777	0,828	0,857
20	0,732	0,796	0,846	0,873
22	0,770	0,832	0,878	0,901
25	0,823	0,878	0,918	0,936
28	0,869	0,915	0,949	0,961
32	0,918	0,951	0,976	0,983
36	0,953	0,975	0,991	0,994
38	0,965	0,982	0,995	0,997
40	0,975	0,988	0,997	0,998
45	0,991	0,996	1,000	1,000
50	0,997	0,999	1,000	1,000
53	0,999	1,000	1,000	1,000
56	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-17

Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 2 – 3000
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45	60
x in μm	D in %	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein			
0,5	0,061	0,081	0,097	0,104
1	0,115	0,148	0,175	0,189
2	0,197	0,247	0,287	0,310
3	0,259	0,320	0,367	0,393
4	0,309	0,375	0,426	0,455
5	0,352	0,422	0,475	0,504
6	0,391	0,463	0,517	0,547
6,5	0,409	0,481	0,536	0,567
7	0,426	0,499	0,554	0,585
7,5	0,442	0,516	0,571	0,602
8	0,458	0,533	0,588	0,619
8,5	0,473	0,548	0,603	0,634
9	0,488	0,563	0,618	0,649
10	0,516	0,591	0,646	0,676
11	0,543	0,618	0,672	0,702
12	0,568	0,642	0,696	0,725
13	0,592	0,666	0,719	0,747
14	0,615	0,688	0,741	0,769
15	0,637	0,710	0,762	0,789
16	0,659	0,731	0,782	0,809
17	0,680	0,751	0,801	0,827
18	0,701	0,771	0,820	0,845
19	0,721	0,790	0,838	0,861
20	0,741	0,809	0,854	0,877
22	0,780	0,843	0,885	0,904
25	0,831	0,887	0,924	0,938
28	0,875	0,922	0,953	0,963
32	0,922	0,955	0,978	0,984
36	0,955	0,976	0,992	0,994
38	0,967	0,983	0,996	0,997
40	0,977	0,989	0,998	0,998
45	0,991	0,996	1,000	1,000
50	0,998	0,999	1,000	1,000
53	0,999	1,000	1,000	1,000
56	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-18 Korngrößenverteilungen der Nachmahlung von Klinker 2 – 4400
in der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

Mahldauer in Sek.	15	30	45
x in μm	D in %	D in %	D in %
Definition	Mittelfein		
0,5	0,081	0,091	0,108
1	0,145	0,167	0,192
2	0,241	0,277	0,313
3	0,317	0,360	0,399
4	0,379	0,425	0,465
5	0,432	0,479	0,518
6	0,477	0,525	0,564
6,5	0,498	0,546	0,584
7	0,518	0,565	0,604
7,5	0,537	0,584	0,622
8	0,556	0,602	0,640
8,5	0,573	0,619	0,657
9	0,591	0,636	0,674
10	0,624	0,668	0,705
11	0,656	0,699	0,735
12	0,688	0,729	0,763
13	0,719	0,757	0,790
14	0,749	0,784	0,815
15	0,778	0,810	0,839
16	0,805	0,835	0,860
17	0,831	0,858	0,880
18	0,855	0,879	0,898
19	0,877	0,898	0,914
20	0,896	0,914	0,928
22	0,928	0,942	0,952
25	0,962	0,970	0,976
28	0,983	0,987	0,990
32	0,996	0,997	0,998
36	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-19 Berechnete Zusammensetzung der Mischungen von Klinker 1

		1-M1	1-M2	1-M3		1-M4	
		2600 Blaine	3000 Blaine	2200 Blaine	4400 Blaine	2200 Blaine	4400 Blaine
	VRM	50%	60%	3%	67%	3%	82%
Feinmahlung	1						
	2						
	3				4%		3%
	4	50%	40%				
	5					12%	
	6			26%			

		1-M5	1-M6		1-M7		1-M8
		2200 Blaine	2200 Blaine	3000 Blaine	2200 Blaine	3000 Blaine	2600 Blaine
	VRM	75%	20%	58%	15%	70%	40%
Feinmahlung	1						
	2			6%			
	3	14%	1%	3%			
	4		2%	0%		15%	60%
	5	11%	4%				
	6		5%				

		1-M9		1-M10	1-M11	
		2200 Blaine	3000 Blaine	3000 Blaine	2200 Blaine	4400 Blaine
	VRM	11%	10%	40%	63%	17%
Feinmahlung	1					
	2					20%
	3	66%		19%		
	4		13%	41%		
	5					
	6					

		1-M12		1-M13	
		2200 Blaine	4400 Blaine	2200 Blaine	2600 Blaine
	VRM	58%	42%	37%	20%
Feinmahlung	1			9%	12%
	2				11%
	3			3%	3%
	4				
	5			5%	
	6				

Tabelle A-13-20 Charakterisierung der Mischungen von Klinker 1

Referenz	Name	ZP ²⁾	ZP _{MS1}	ZP _{MS2} ¹⁾	Feinstgut	Abweichung	Spez. Oberfläche nach Blaine in cm ² /g
Mittlerer CEM I 32,5	1-M11	A3	2	2	20%	0,011	3570
	1-M12	A3	2	2	0%	0,025	3470
	1-M13	A1	2	∞	43%	0,039	3620
Mittlerer CEM I 42,5	1-M5	A3	1	2	25%	0,040	3230
	1-M6	A2	2	∞	22%	0,070	3520
	1-M7	A2	2	2	15%	0,088	3530
Mittlerer CEM I 52,5	1-M8	A1	2	2	60%	0,535	4360
	1-M9	A2	2	2	79%	0,023	4800
	1-M10	A2	1	∞	60%	0,049	4730
Referenzmahlung	1-M1	A1	2	1	50%	0,257	4090
	1-M2	A2	1	1	40%	0,255	4340
	1-M3	A3	2	1	30%	0,013	4730
	1-M4	A3	2	1	15%	0,035	4760

¹⁾ ∞ entspricht der maximal verfügbaren Anzahl

²⁾ Zusammensetzung der Zwischenprodukte nach Tabelle 8-2

Tabelle A-13-21 Zementeigenschaften der Mischungen von Klinker 1 nach DIN EN 196

Name	Lageparameter x' nach RRSB in µm	Steigungsmaß n nach RRSB	Wasseranspruch in %	Festigkeit			Spez. Oberfläche nach Blaine in cm ² /g
				2d	7d	28d	
Referenzmahlung	10,9	0,91	33,5	40,0	56,3	66,6	4950
1-M1	14,7	0,84	28,0	26,9	56,2	69,2	4090
1-M2	13,8	0,86	31,0	33,7	57,1	69,9	4340
1-M3	10,4	0,90	31,0	38,1	59,3	69,0	4730
1-M4	10,0	0,94	33,0	39,4	58,1	71,0	4760
1-M5	20,5	0,86	24,5	22,3	44,7	63,8	3230
1-M6	16,9	0,90	27,5	27,8	52,2	65,7	3520
1-M7	16,9	0,92	27,5	28,4	52,0	68,0	3530
1-M8	13,2	0,81	28,5	31,6	58,0	72,3	4360
1-M9	11,6	0,78	28,5	34,4	58,2	71,0	4800
1-M10	12,1	0,80	29,5	37,0	57,3	69,6	4730
1-M11	16,2	0,80	25,5	25,9	48,3	64,0	3570
1-M12	16,3	0,87	25,5	25,2	47,6	63,3	3470
1-M13	17,6	0,85	25,5	24,1	48,2	64,9	3620

Tabelle A-13-22

Berechnete Zusammensetzung der Mischungen von Klinker 2

		2-M1	2-M2	2-M3	
		2600 Blaine	3000 Blaine	2200 Blaine	4400 Blaine
	VRM	50%	60%		70%
Feinmahlung	1				
	2				
	3				3%
	4	50%	40%		
	5				
	6			27%	

		2-M4	2-M5	2-M6	2-M7
		2200 Blaine	2600 Blaine	2600 Blaine	2200 Blaine
	VRM	75%	70%	85%	40%
Feinmahlung	1	0%			
	2	3%			
	3		7%		
	4	22%	11%	15%	60%
	5				
	6				

		2-M8	2-M9	2-M10	2-M11
		2600 Blaine	2600 Blaine	2200 Blaine	2200 Blaine
	VRM	40%	75%		
Feinmahlung	1			60%	51%
	2				1%
	3				15%
	4	60%	25%		31%
	5			34%	3%
	6			6%	

		2-M12		2-M13	
		2200 Blaine	2600 Blaine	2200 Blaine	2600 Blaine
	VRM				
Feinmahlung	1	32%	30%	32%	30%
	2				
	3	5%	6%	5%	6%
	4		4%		4%
	5	2%	9%	2%	9%
	6	2%		2%	

Tabelle A-13-23 Charakterisierung der Mischungen von Klinker 2

Referenz	Name	ZP ²⁾	ZP _{MS1}	ZP _{MS2} ¹⁾	Feinstgut	Abweichung	Spez. Oberfläche nach Blaine in cm ² /g
Mittlerer CEM I 32,5	2-M10	B2	1	1	40%	0,047	3940
	2-M11	B2	1	∞	49%	0,052	3960
	2-M12 ³⁾	B2	2	∞	28%	0,060	3950
	2-M13 ³⁾	B2	2	∞	38%	0,060	3920
Mittlerer CEM I 42,5	2-M4	B1	1	∞	25%	0,085	3820
	2-M5	B3	2	∞	24%	0,073	4050
	2-M6	B2	2	2	15%	0,077	3890
Mittlerer CEM I 52,5	2-M7	B1	2	1	60%	0,032	4920
	2-M8	B2	2	1	60%	0,023	4930
	2-M9	B2	1	1	25%	0,318	3940
Referenzmahlung	2-M1	B1	1	1	50%	0,229	4750
	2-M2	B2	1	1	40%	0,305	4520
	2-M3	B3	2	1	30%	0,0175	5220

¹⁾ ∞ entspricht der maximal verfügbaren Anzahl der Zwischenprodukte bei der Modellrechnung

²⁾ Zusammensetzung der Zwischenprodukte nach Tabelle 8-2

³⁾ Doppelbestimmung

Tabelle A-13-24 Zementeigenschaften der Mischungen von Klinker 2 nach DIN EN 196

Name	Lageparameter x' nach RRSB in µm	Steigungsmaß n nach RRSB	Wasseranspruch in %	Festigkeit			Spez. Oberfläche nach Blaine in cm ² /g
				2d	7d	28d	
Referenzmahlung	10,2075	0,88	31,00	32,20	43,60	58,00	5270
2-M1	14,17	0,84	30,00	23,70	38,30	52,80	4750
2-M2	14,31	0,85	29,00	24,60	37,20	53,30	4520
2-M3	10,70	0,90	32,00	28,60	43,80	57,10	5220
2-M4	12,70	0,80	30,50	23,90	38,30	52,20	3820
2-M5	11,97	0,77	30,00	23,40	37,80	52,50	4050
2-M6	16,32	0,89	30,00	23,90	36,50	51,90	3890
2-M7	17,73	0,94	29,00	25,90	41,20	54,70	4920
2-M8	16,78	0,90	28,50	25,00	40,50	54,50	4930
2-M9	17,87	0,93	29,00	24,30	39,00	52,60	3940
2-M10	17,54	0,82	28,00	21,70	37,20	50,00	3940
2-M11	17,29	0,83	28,00	22,70	35,80	51,40	3960
2-M12 ¹⁾	17,73	0,87	28,00	23,00	37,90	52,30	3950
2-M13 ¹⁾	17,20	0,87	28,50	23,20	37,90	49,90	3960

¹⁾ Doppelbestimmung

Tabelle A-13-25 Korngrößenverteilung von Klinker 3

Sieb-Maschenweite	Summe Rückstand
mm	%
31,5	1,44
30 (interpoliert)	2,30
25	5,09
20	16,62
16	30,47
10	59,67
8	69,66
4	85,09
2	91,73
1	93,51
0,5	94

Tabelle A-13-26

Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte der Argo-Mühle
gemahlen aus Klinker 3.

x in μm	Mittelwert Klinker 3-A3	Mittelwert Klinker 3-A2	Mittelwert Klinker 3-A1
Definition	Grob		Supergrob
0,5	0,019	0,014	0,013
1	0,045	0,034	0,030
2	0,085	0,066	0,059
3	0,115	0,089	0,081
4	0,143	0,111	0,100
5	0,172	0,132	0,119
6	0,199	0,152	0,137
7	0,227	0,172	0,155
8	0,253	0,191	0,173
9	0,280	0,211	0,190
10	0,306	0,231	0,208
11	0,332	0,251	0,225
12	0,358	0,271	0,243
13	0,384	0,291	0,260
14	0,410	0,312	0,278
16	0,463	0,352	0,314
18	0,516	0,393	0,349
20	0,569	0,433	0,385
22	0,622	0,471	0,420
25	0,699	0,527	0,471
28	0,769	0,579	0,519
32	0,844	0,644	0,578
36	0,899	0,704	0,632
38	0,920	0,732	0,656
40	0,938	0,759	0,680
45	0,970	0,818	0,734
50	0,986	0,866	0,781
53	0,992	0,890	0,806
56	1,000	0,911	0,829
63	1,000	0,948	0,874
71	1,000	0,975	0,914
75	1,000	0,983	0,930
80	1,000	0,990	0,946
85	1,000	0,994	0,960
90	1,000	0,997	0,971
95	1,000	1,000	0,979
100	1,000	1,000	0,985
106	1,000	1,000	0,991
112	1,000	1,000	0,994
125	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-27

Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte der Netzsch Pamir®.

x in μm	3-U4	3-U5	3-U6	3-U7	3-U1	3-U2	3-U3	3-U2*
Definition	Fein	Fein	Mittelfein		Superfein	Fein	Mittelfein	Fein
0,5	0,078	0,086	0,045	0,026	0,096	0,098	0,064	0,094
1	0,168	0,150	0,089	0,055	0,192	0,167	0,116	0,160
2	0,313	0,258	0,166	0,099	0,347	0,279	0,201	0,273
3	0,442	0,359	0,232	0,134	0,486	0,385	0,277	0,379
4	0,574	0,445	0,289	0,167	0,622	0,476	0,340	0,468
5	0,694	0,521	0,337	0,200	0,738	0,556	0,392	0,545
6	0,792	0,590	0,379	0,232	0,828	0,628	0,436	0,615
6,5	0,830	0,623	0,398	0,247	0,861	0,662	0,456	0,648
7	0,861	0,654	0,417	0,263	0,889	0,695	0,474	0,680
7,5	0,888	0,684	0,435	0,278	0,911	0,725	0,492	0,710
8	0,909	0,713	0,452	0,294	0,929	0,754	0,509	0,738
8,5	0,926	0,739	0,470	0,309	0,943	0,780	0,525	0,765
9	0,941	0,764	0,487	0,324	0,954	0,805	0,541	0,790
10	0,962	0,807	0,520	0,354	0,970	0,846	0,572	0,832
11	0,975	0,843	0,552	0,383	0,981	0,879	0,602	0,867
12	0,984	0,871	0,585	0,412	0,987	0,906	0,632	0,894
13	0,991	0,893	0,616	0,440	0,992	0,926	0,661	0,917
14	0,995	0,911	0,648	0,468	0,995	0,943	0,689	0,934
15	0,997	0,926	0,678	0,496	0,998	0,955	0,718	0,949
16	0,999	0,937	0,708	0,524	0,999	0,966	0,746	0,960
17	1,000	0,947	0,737	0,552	1,000	0,974	0,772	0,969
18	1,000	0,955	0,766	0,580	1,000	0,980	0,798	0,976
19	1,000	0,962	0,793	0,607	1,000	0,985	0,822	0,982
20	1,000	0,968	0,819	0,634	1,000	0,989	0,844	0,987
22	1,000	0,978	0,864	0,687	1,000	0,994	0,882	0,993
25	1,000	0,988	0,916	0,761	1,000	0,998	0,927	0,998
28	1,000	0,995	0,951	0,827	1,000	1,000	0,958	1,000
32	1,000	0,999	0,979	0,893	1,000	1,000	0,983	1,000
36	1,000	1,000	0,993	0,938	1,000	1,000	0,994	1,000
38	1,000	1,000	0,996	0,954	1,000	1,000	0,997	1,000
40	1,000	1,000	0,998	0,967	1,000	1,000	0,999	1,000
45	1,000	1,000	1,000	0,988	1,000	1,000	1,000	1,000
50	1,000	1,000	1,000	0,996	1,000	1,000	1,000	1,000
53	1,000	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
56	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
63	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

* Versuch mit Zugabe eines Mahlhilfsmittels

Fortsetzung Tabelle A-13-27 - Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte der Netzsch Pamir®.

x in μm	3-D1	3-D2	3-D3	3-D4	3-D5	3-D6	3-D7	3-D8
Definition	Mittelfein							Grob
0,5	0,072	0,074	0,060	0,041	0,053	0,051	0,037	0,031
1	0,124	0,126	0,108	0,079	0,098	0,093	0,074	0,061
2	0,206	0,208	0,184	0,141	0,171	0,162	0,138	0,111
3	0,279	0,281	0,251	0,195	0,235	0,224	0,192	0,154
4	0,344	0,343	0,310	0,243	0,292	0,277	0,239	0,192
5	0,400	0,394	0,361	0,286	0,341	0,323	0,280	0,227
6	0,448	0,436	0,404	0,324	0,385	0,364	0,316	0,258
6,5	0,470	0,455	0,424	0,342	0,405	0,382	0,333	0,273
7	0,490	0,472	0,443	0,360	0,424	0,400	0,350	0,287
7,5	0,509	0,489	0,461	0,377	0,443	0,417	0,366	0,301
8	0,527	0,505	0,478	0,393	0,461	0,434	0,381	0,315
8,5	0,544	0,520	0,494	0,409	0,479	0,450	0,397	0,329
9	0,560	0,535	0,510	0,425	0,496	0,466	0,412	0,342
10	0,591	0,563	0,541	0,454	0,529	0,496	0,441	0,368
11	0,620	0,590	0,570	0,483	0,561	0,526	0,469	0,393
12	0,648	0,617	0,598	0,511	0,591	0,554	0,497	0,418
13	0,674	0,642	0,624	0,539	0,619	0,581	0,523	0,442
14	0,699	0,667	0,651	0,565	0,646	0,608	0,549	0,466
15	0,723	0,692	0,676	0,592	0,672	0,633	0,574	0,489
16	0,745	0,715	0,701	0,618	0,697	0,658	0,599	0,512
17	0,767	0,739	0,725	0,644	0,720	0,683	0,623	0,534
18	0,788	0,761	0,748	0,669	0,743	0,707	0,647	0,556
19	0,807	0,783	0,771	0,695	0,765	0,730	0,670	0,578
20	0,826	0,804	0,793	0,720	0,785	0,752	0,693	0,599
22	0,859	0,842	0,834	0,767	0,823	0,794	0,737	0,640
25	0,898	0,889	0,884	0,828	0,870	0,848	0,798	0,697
28	0,927	0,924	0,921	0,877	0,907	0,891	0,851	0,749
32	0,956	0,957	0,956	0,926	0,944	0,934	0,905	0,810
36	0,975	0,978	0,977	0,959	0,969	0,963	0,944	0,863
38	0,982	0,984	0,984	0,971	0,977	0,973	0,958	0,885
40	0,987	0,989	0,989	0,979	0,984	0,981	0,970	0,904
45	0,995	0,996	0,996	0,993	0,994	0,993	0,988	0,943
50	0,998	0,999	0,999	0,998	0,998	0,998	0,997	0,969
53	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,980
56	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,987
63	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle A-13-28 Kennzahlen, RRSB-Parameter und spezifische Oberfläche (Blaine) der Mischungen aus Klinker 3

		CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 R
Zusammensetzung der Mischung				
3-A1	MS1	53,9 %	10,5 %	-
3-A3		17,2 %	50,0 %	0,2%
3-D3	MS2	28,9 %	39,5 %	-
3-U1		-	-	10,3%
3-U3		-	-	89,5%
Kenndaten der Mischung				
Abweichung		0,0227	0,0090	
Spezifischer Energiebedarf Modellrechnung		26,9 kWh/t	36,3 kWh/t	103,8 kWh/t
Spezifische Oberfläche nach Blaine		2860 cm²/g	3360 cm²/g	5340 cm²/g
Lageparameter nach RRSB		25,2 µm	18,8 µm	10,3 µm
Steigungsmaß nach RRSB		0,92	0,96	0,87

B Bilder

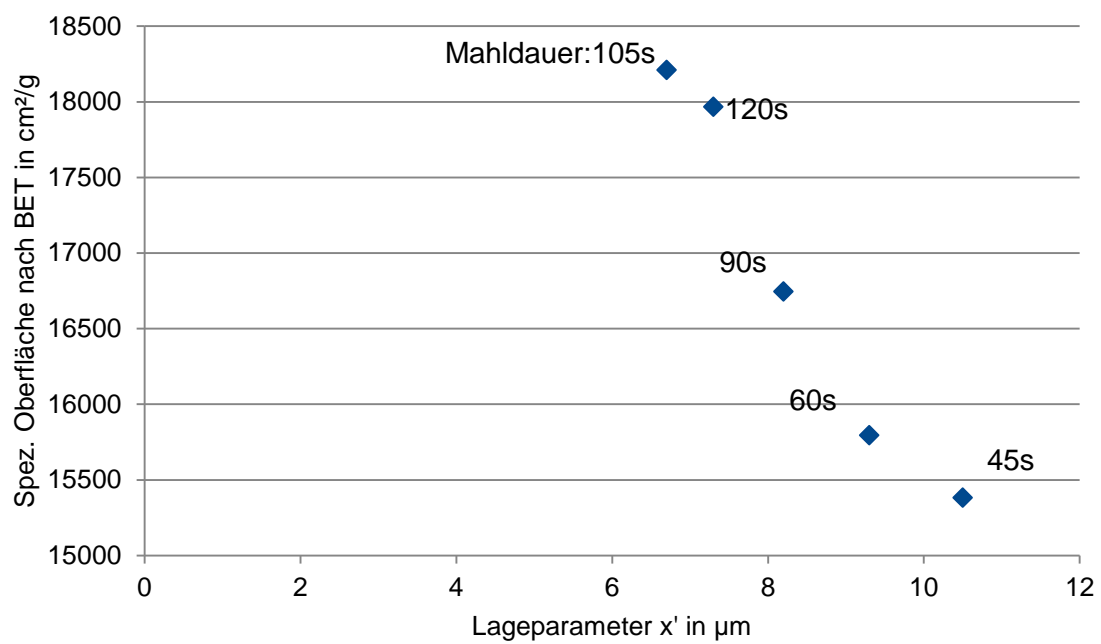


Bild B 13-1 Exemplarische Gegenüberstellung BET-Messung und Lageparameter von Klinker 1 bei Mahlung mit der diskontinuierlichen Rührwerkskugelmühle

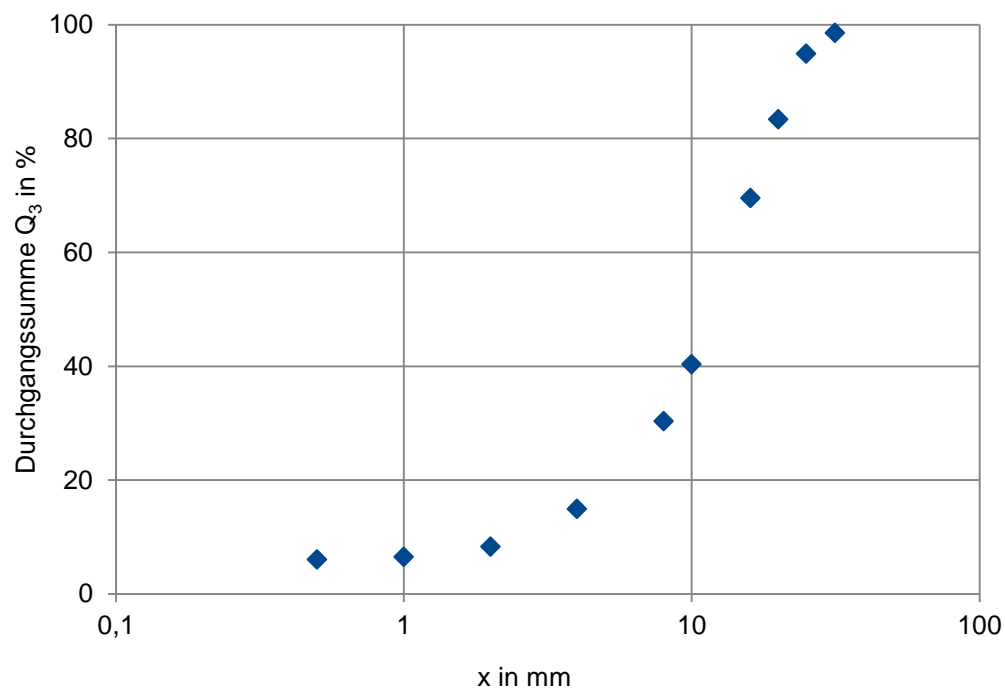


Bild B 13-2 Ergebnisse der Siebanalyse von Klinker 3

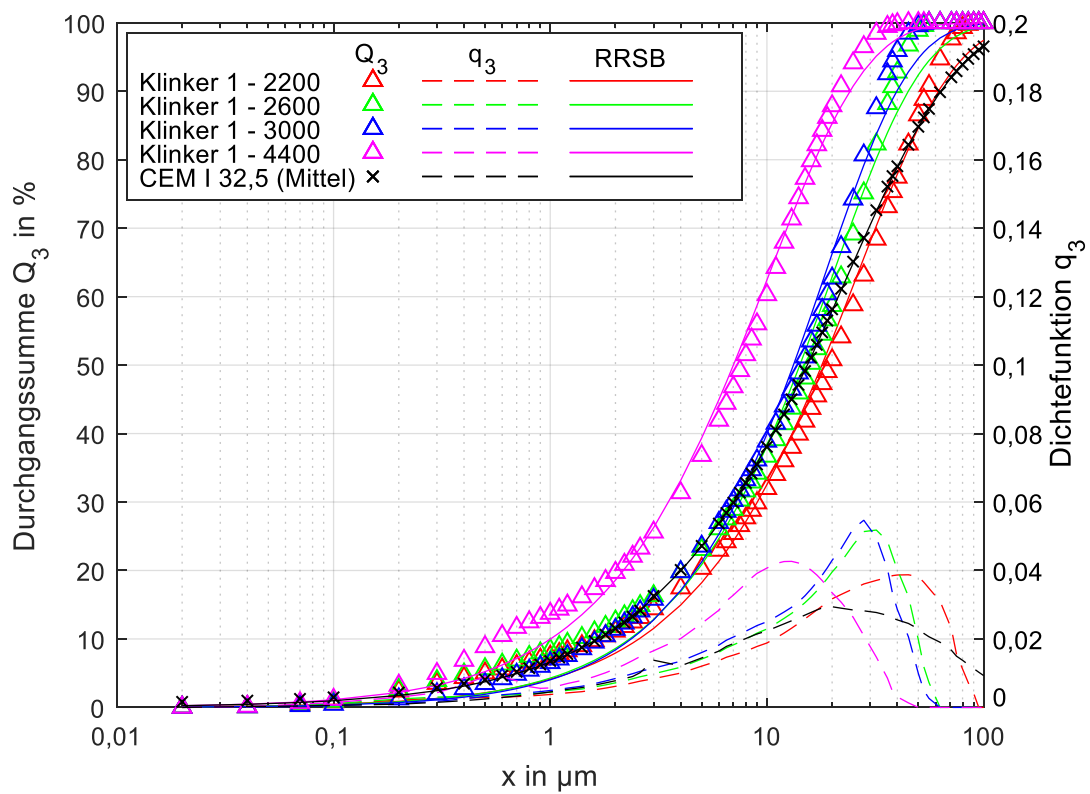


Bild B 13-3 Korngrößenverteilungen bei Mahlung von Klinker 1 in der Vertikal-Wälzmühle und Vergleich zu einer mittleren Korngrößenverteilung eines CEM I 32,5

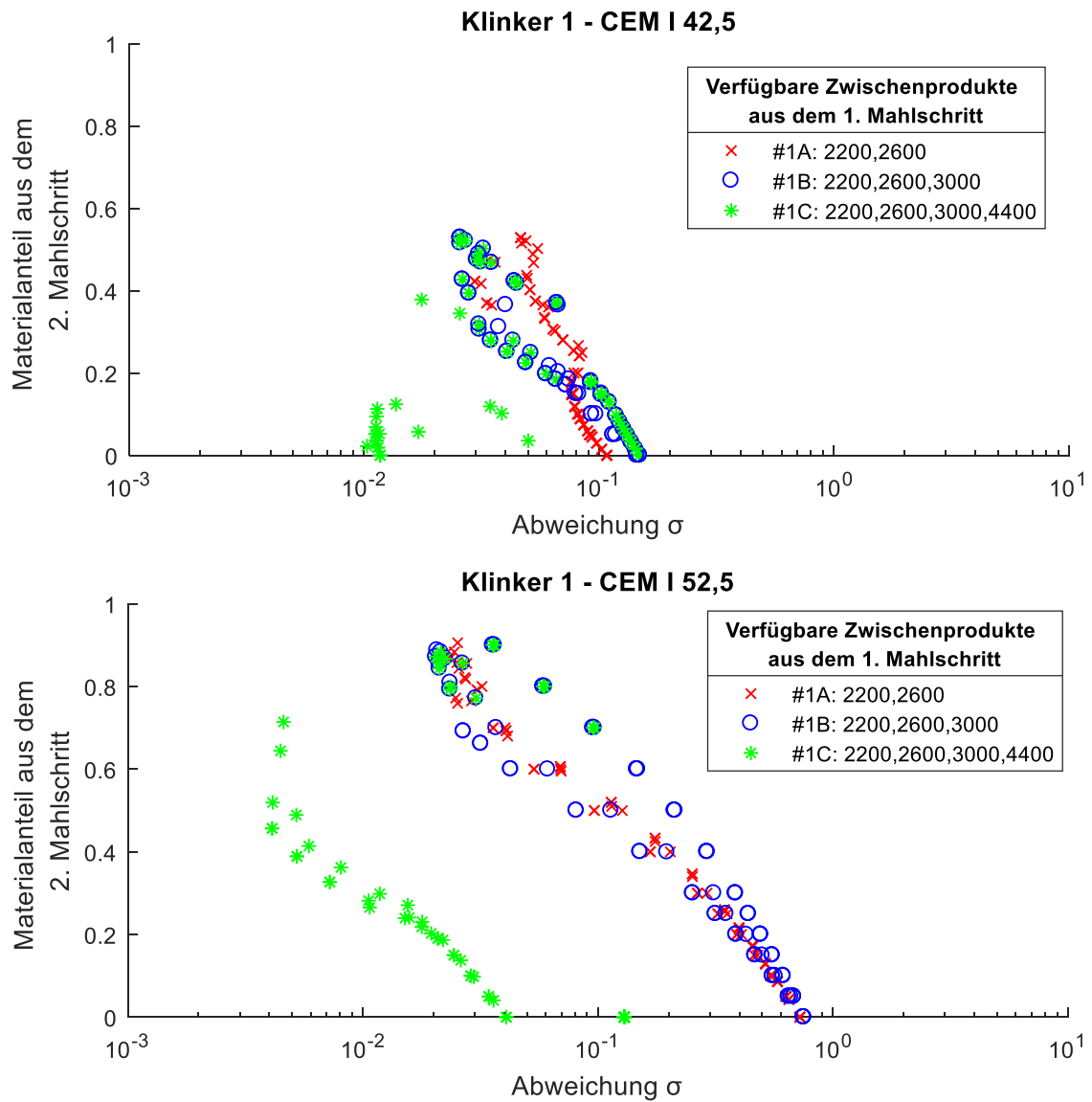


Bild B 13-4 Einfluss des Materialanteils aus dem 2. Mahlschritt auf die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung (Klinker 1)

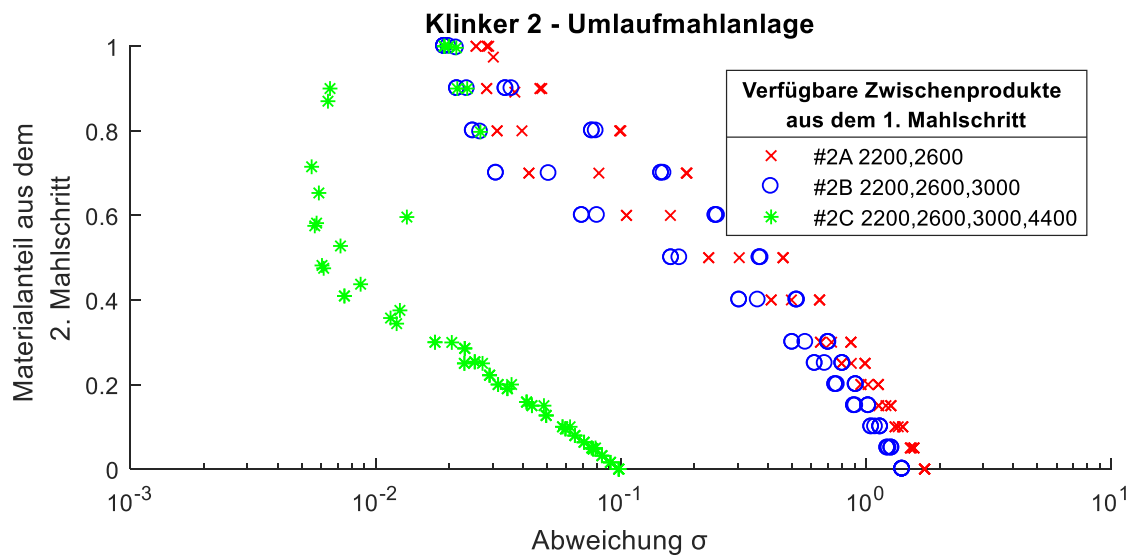
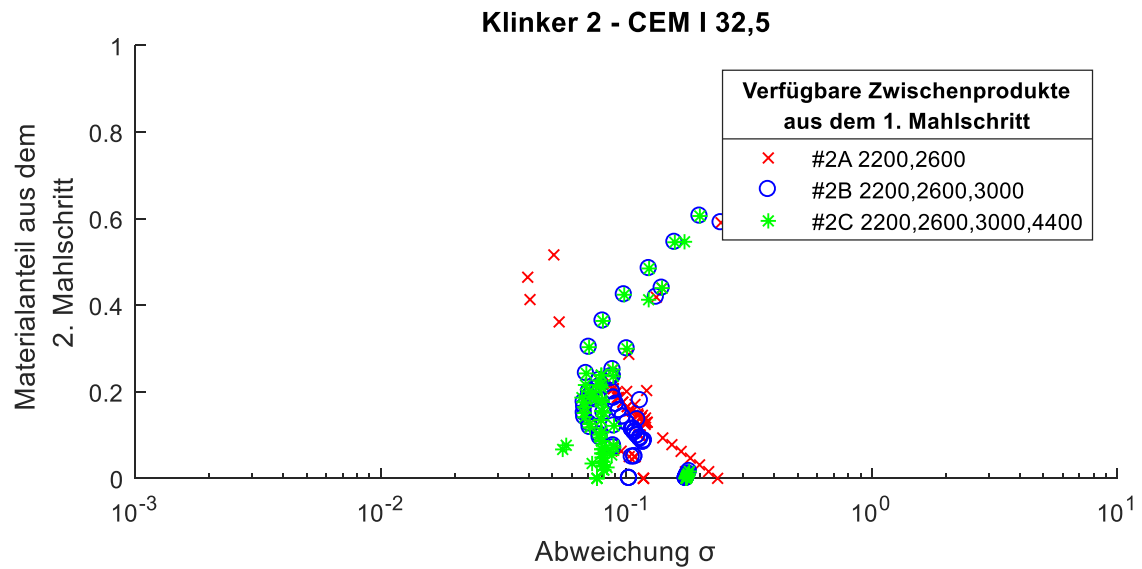


Bild B 13-5 Einfluss des Materialanteils aus dem 2. Mahlschritt auf die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung (Klinker 2)

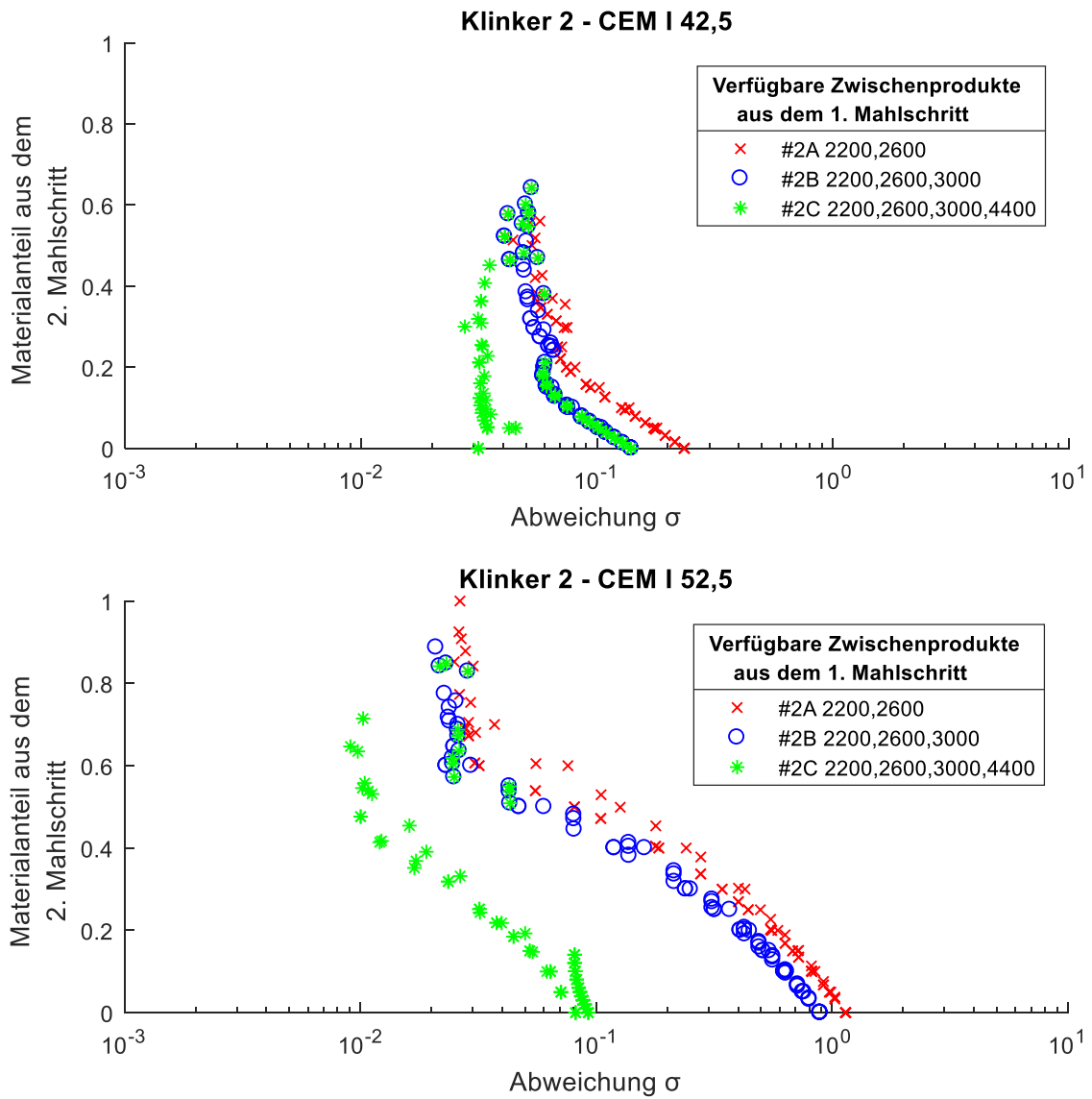


Bild B 13-6 Einfluss des Materialanteils aus dem 2. Mahlschritt auf die Abweichung der Korngrößenverteilung der Mischung (Klinker 2)

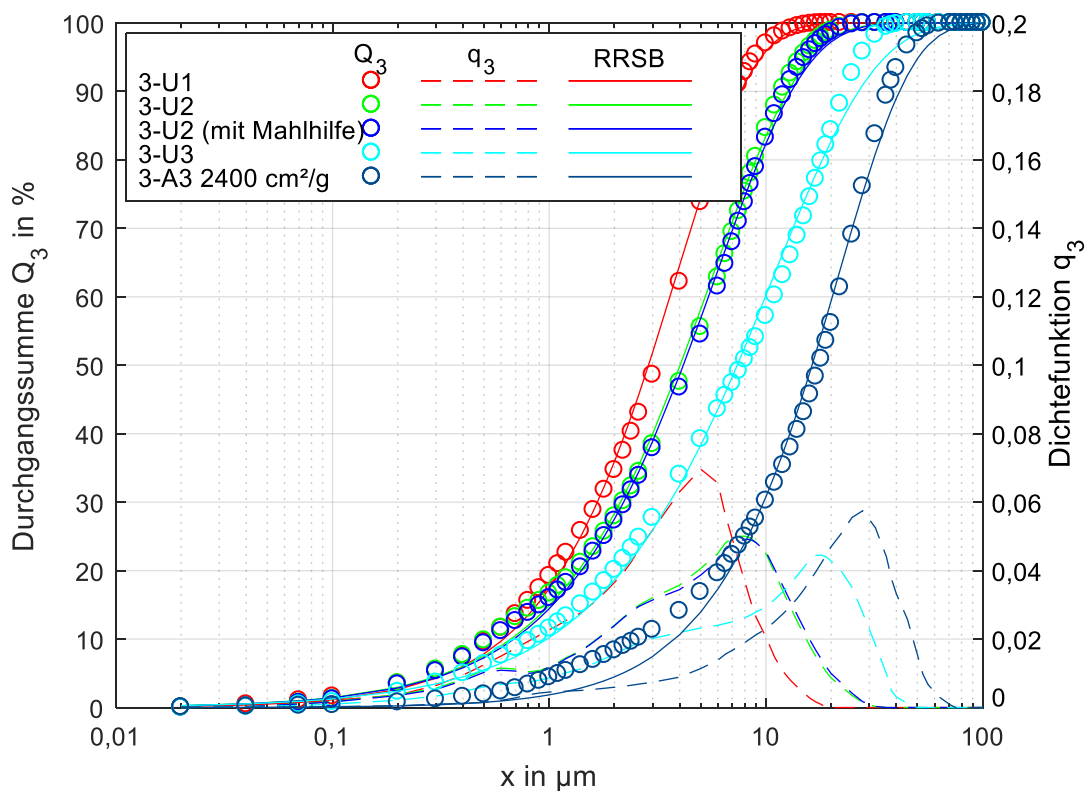
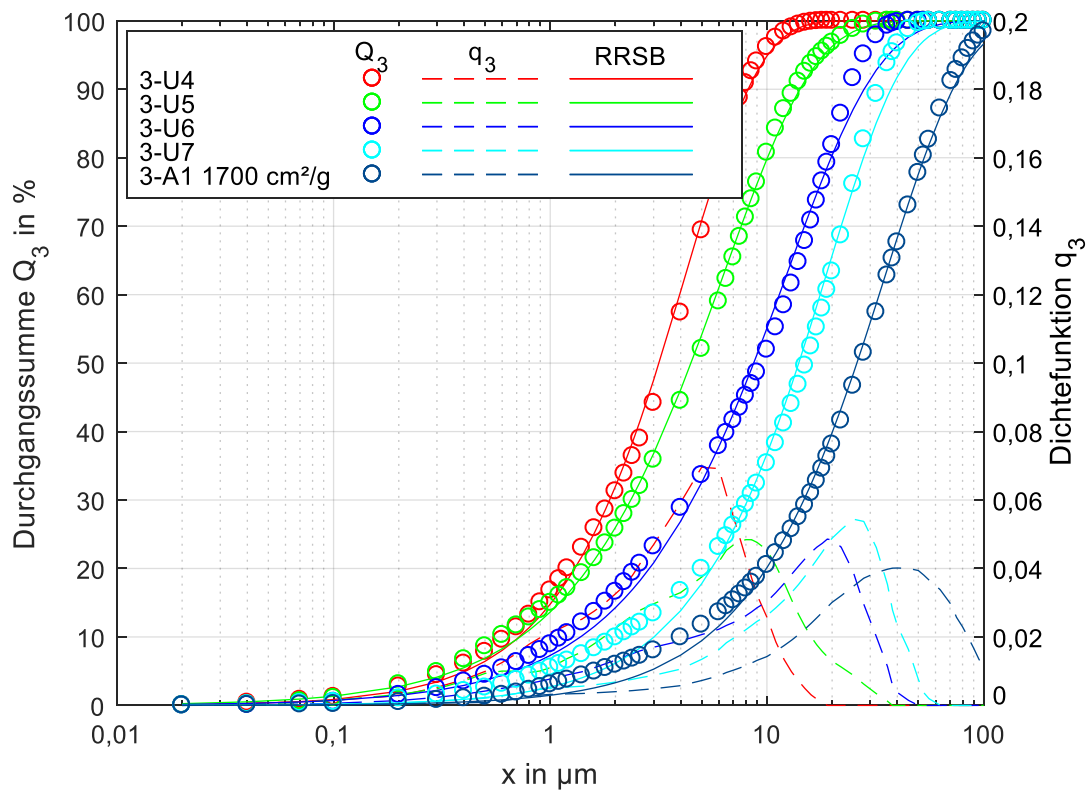


Bild B 13-7 Korngrößenverteilungen der feinstgemahlenen Zwischenprodukte, gemahlen im Umlaufbetrieb (U) in einer Netzsch Pamir® Rührwerkskugelmühle.
Oben: aus 3-A1. Unten: aus 3-A3

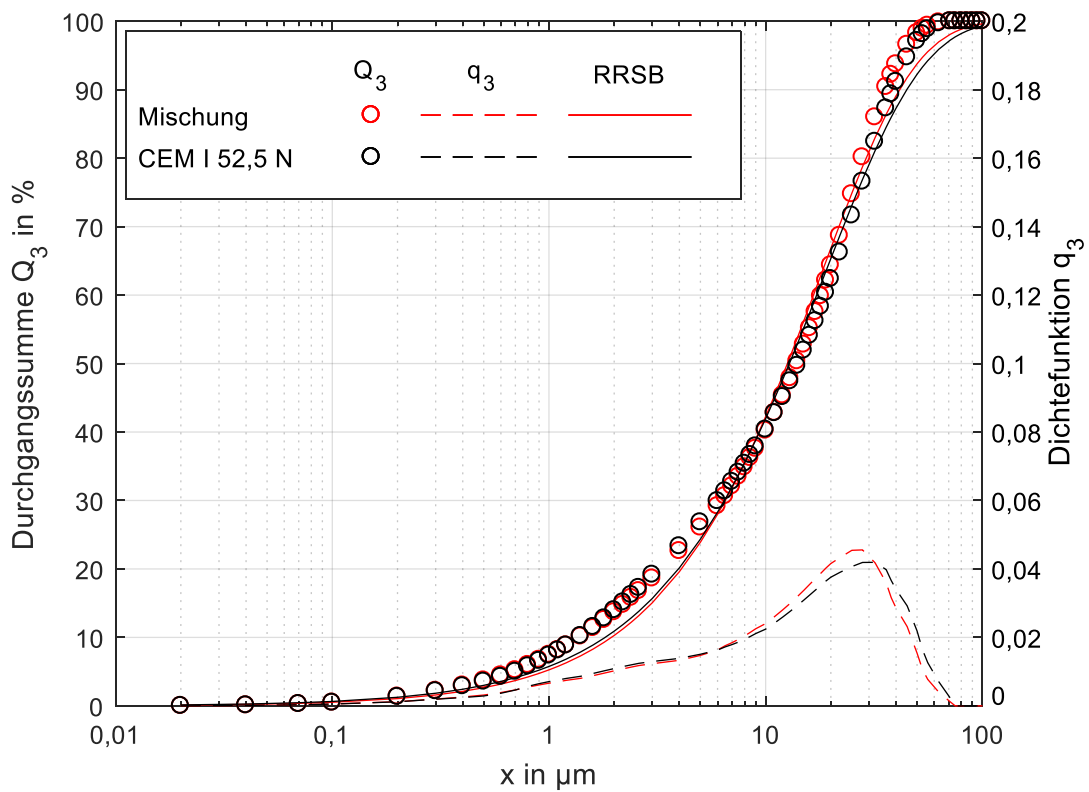
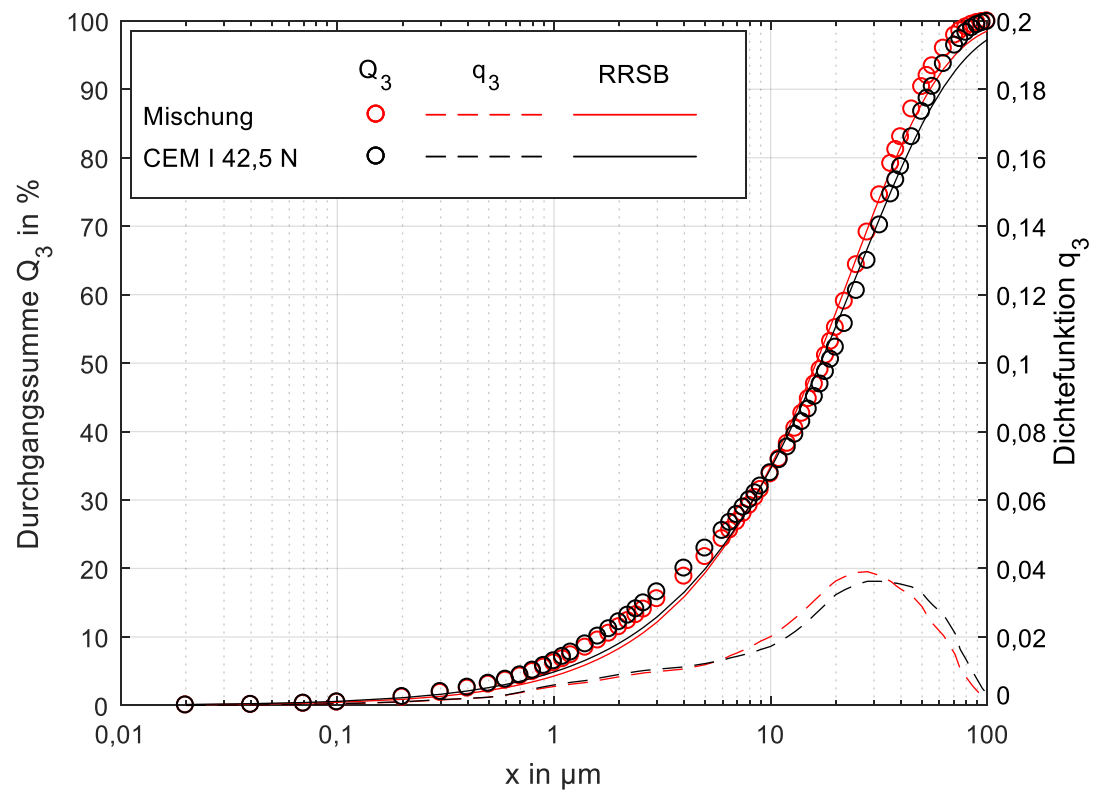


Bild B 13-8 Korngrößenverteilungen der Mischung von Klinker 3 im Vergleich zur Referenz. Oben CEM I 42,5 N, Unten: CEM I 52,5 N

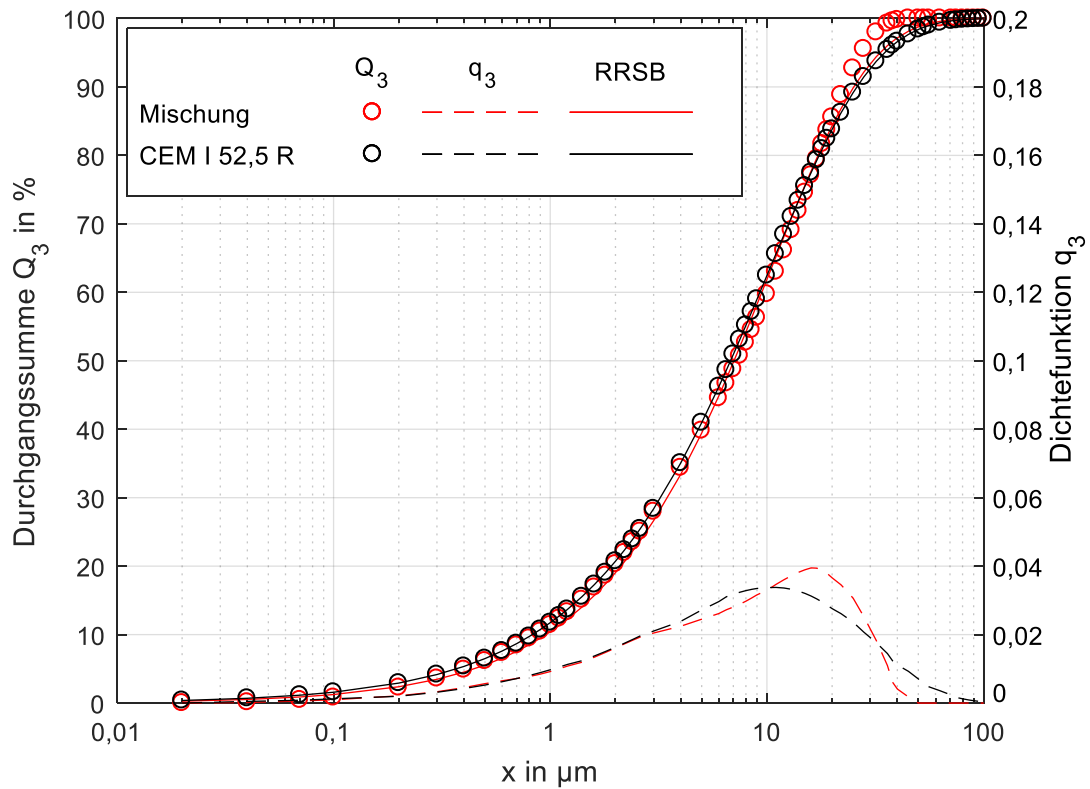


Bild B 13-9 Korngrößenverteilungen der Mischung von Klinker 3 im Vergleich zur Referenz-Korngrößenverteilung (CEM I 52,5 R)

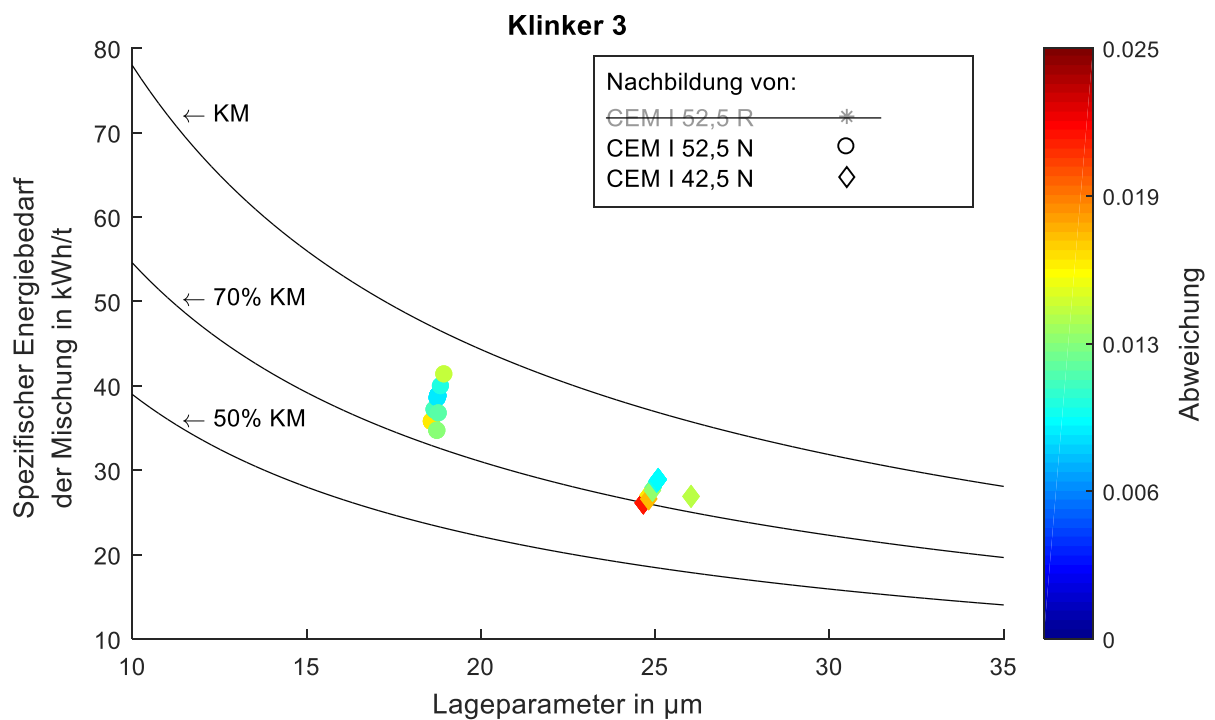


Bild B 13-10 Ergebnisse von Modellszenario 3 (alle Zwischenprodukte die aus 3-A3 durch Durchlaufmahlung im 2. Mahlschritt gemahlen wurden)

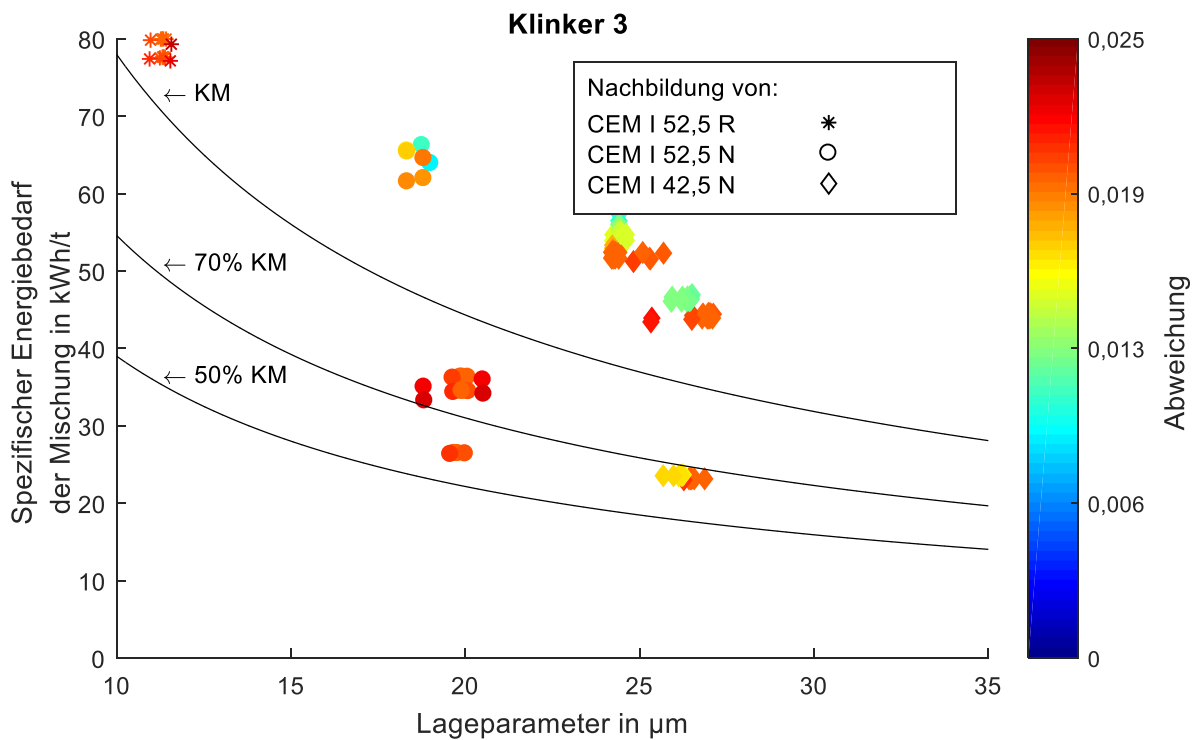


Bild B 13-11 Ergebnisse von Modellszenario 1 (alle Zwischenprodukte aus der Durchlaufmahlung aus dem 2. Mahlschritt) mit maximierter Abweichung

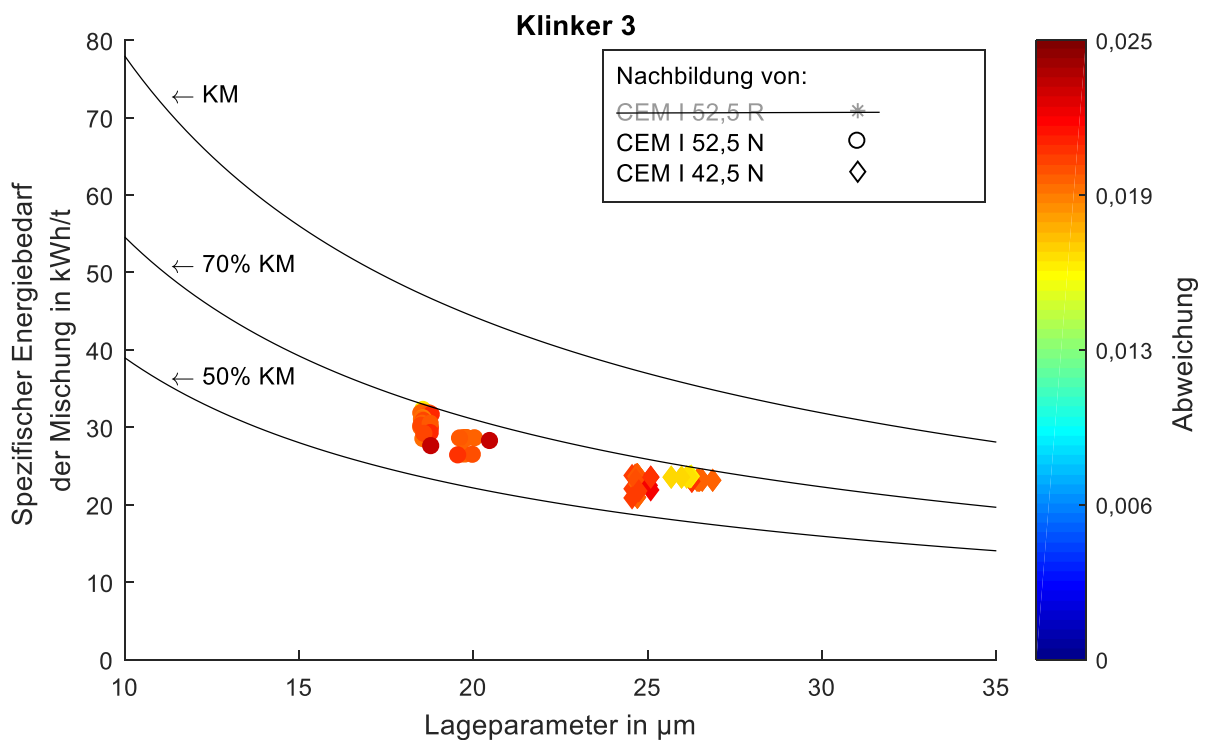


Bild B 13-12 Ergebnisse von Modellszenario 3 (alle Zwischenprodukte aus der Durchlaufmahlung des 2. Mahlschritts) mit maximierter Abweichung

C Berechnung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Korngrößenverteilungen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (kurz Dichtefunktionen) werden nach **Gleichung 9** berechnet. Korngrößenverteilungen werden meist mit logarithmischer Einteilung der Abszisse dargestellt. Um die Messwerte für den Betrachter besser darzustellen, sollte die Dichtefunktion entsprechend **Gleichung 10** berechnet werden. Die in dieser Arbeit dargestellten Dichtefunktionen werden nach **Gleichung 10** berechnet und mit logarithmisch eingeteilter Abszisse dargestellt [Cil 2011].

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad \text{Gleichung 9}$$

$$q(x_i) = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\log\left(\frac{x_i}{x_{i-1}}\right)} \quad \text{Gleichung 10}$$

Bild C 13-13 zeigt beispielhaft den Unterschied der Berechnung der Dichtefunktion nach **Gleichung 9** und **Gleichung 10**. Für den Betrachter scheint der Bereich kleiner 10 µm einen Großteil des Produktes zu enthalten, wenn **Gleichung 9** verwendet wird.

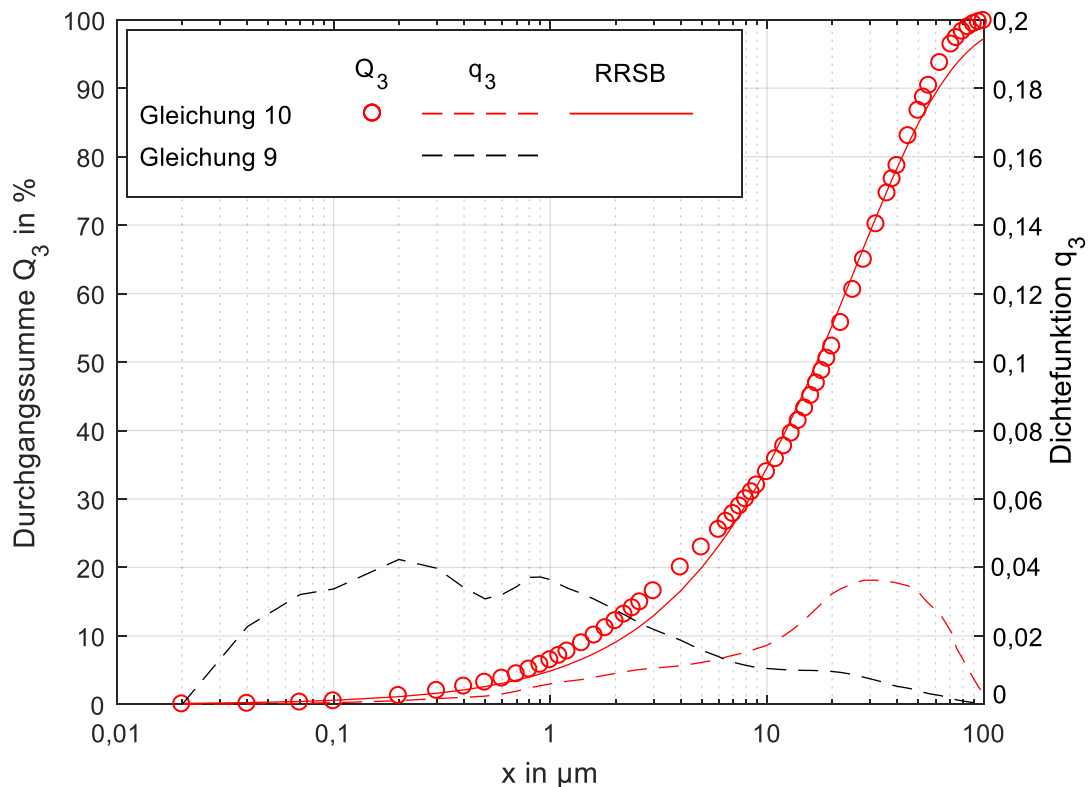


Bild C 13-13 Berechnung der Dichteverteilung von Korngrößenverteilungen

D Voruntersuchungen zur Verwendung der Zwischenprodukte im Modell

In Voruntersuchungen wurden für die Nachbildung der Referenz-Korngrößenverteilung alle Zwischenprodukte (aus dem 1. und 2. Mahlschritt) in einem Optimierungsschritt gleichzeitig verwendet (**Bild D 13-14**). Durch die gleichzeitige Verwendung von allen Korngrößenverteilungen kann, unter den gegebenen Randbedingungen, immer die bestmögliche Mischung identifiziert werden, um die gewünschte Korngrößenverteilung nachzubilden.

Nicht in jedem Fall ist die Herstellung einer identischen Korngrößenverteilung notwendig. Die Zementeigenschaften hängen unter anderem zwar direkt von der Korngrößenverteilung ab, es ist jedoch nicht zwingend erforderlich, in jedem Punkt der Korngrößenverteilung eine absolute Übereinstimmung zu erreichen. Geringe Abweichungen zwischen den Korngrößenverteilungen führen nicht unbedingt zu signifikanten Unterschieden in den Zementeigenschaften.

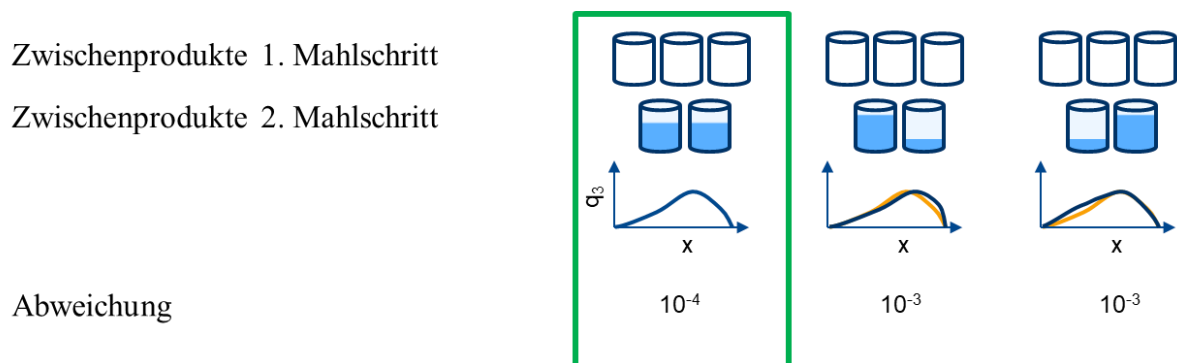


Bild D 13-14 Visualisierung

In diesem Berechnungsansatz wird nicht unterschieden, ob die Zwischenprodukte aus dem 1. oder dem 2. Mahlschritt stammen. Modellrechnungen haben gezeigt, dass bevorzugt Korngrößenverteilungen aus dem 2. Mahlschritt verwendet wurden. Diese waren aufgrund ihrer Feinheit und der Breite der Korngrößenverteilung besonders gut geeignet, um die beste Übereinstimmung zwischen der berechneten Korngrößenverteilung der Mischung und der Referenz-Korngrößenverteilung zu erzielen. Da die berechnete Mischung keine Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt enthielt, konnte das Potential der Zwischenprodukte aus dem 1. Mahlschritt (z.B. zum Senken des spezifischen Energiebedarfs) nicht ausgeschöpft werden.

E Statistik zum mittleren spezifischen Energiebedarf von Kugelmöhlen

Zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs von Zementen wurden Daten von 59 CEM I-Zementen, gemahlen in unterschiedlichen Kugelmöhlen, ausgewertet.

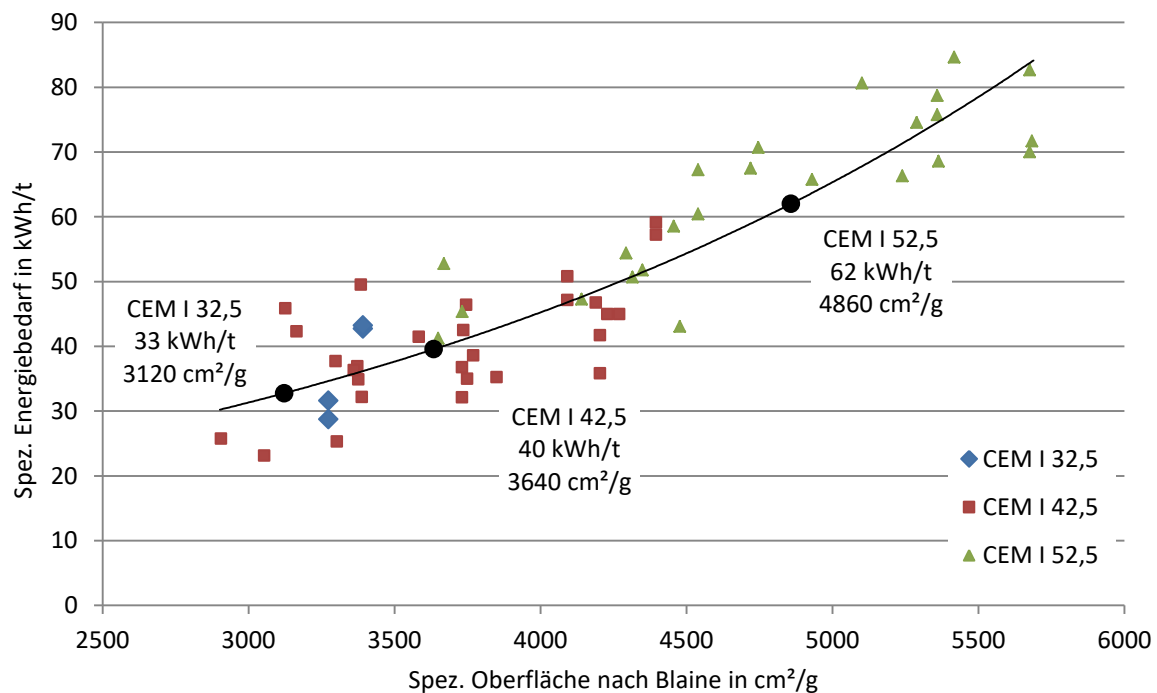


Bild D 13-15 Spezifischer Energiebedarf bei unterschiedlichen spezifischen Oberflächen nach Blaine [VDZ gGmbH 2019]

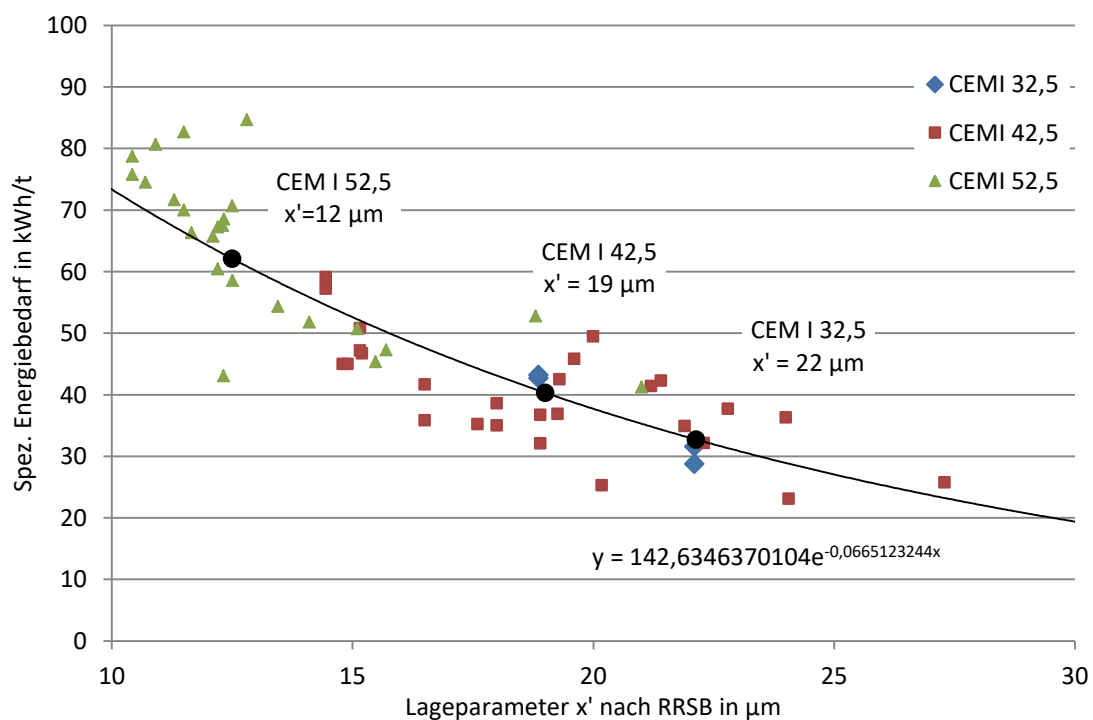




Bild D 13-16 Spezifischer Energiebedarf bei unterschiedlichen Lageparametern nach RRSB [VDZ gGmbH 2019]

F Definition der Feinheitsbereiche bei der separaten Feinstmahlung

Die Beschreibung mehrstufiger Mahlprozesse, wie die separate Feinstmahlung, benötigt eine klare Definition der Feinheitsbereiche. Mit steigender Anzahl der Zwischenprodukte wird empfohlen die in **Tabelle F-29** dargestellten Begrifflichkeiten zu verwenden, um die Bezeichnung der Feinheitsbereiche der Zwischenprodukte der beiden Mahlschritte möglichst einheitlich zu gestalten. Supergrobe und grobe Zwischenprodukte werden ausschließlich in 1. Mahlschritt (MS1) ermahlen. Im MS1 können ggf. grobe Zemente hergestellt werden. Mittelfeine Zwischenprodukte können sowohl im 1. als auch im 2. Mahlschritt hergestellt werden. Dies hängt auch von der verwendeten Anlagentechnik ab. Für feinere Zemente wird ein zusätzlicher Feinstanteil benötigt, der im 2. Mahlschritt (MS2) hergestellt wird. Die hier hergestellten mittelfeinen, feinen oder superfeinen Zwischenprodukte stellen hohe Feinstanteile bereit.

Tabelle F-29 Definition der Feinheitsbereiche

Definition	Bereich $D_{90\%}$ in μm	Mahlschritt	Typische Produkte
Supergrob (Engl.: supercoarse)	>64	MS1 	
Grob (Engl.: coarse)	32-64		CEM I 32,5 / 42,5
Mittelfein (Engl.: mid-fine)	16-32	MS2 	CEM I 52,5
Fein (Engl.: fine)	8-16		
Superfein (Engl.: superfine)	<8		Typischer Bereich verantwortlich für die Frühfestigkeit [ECR 2015]